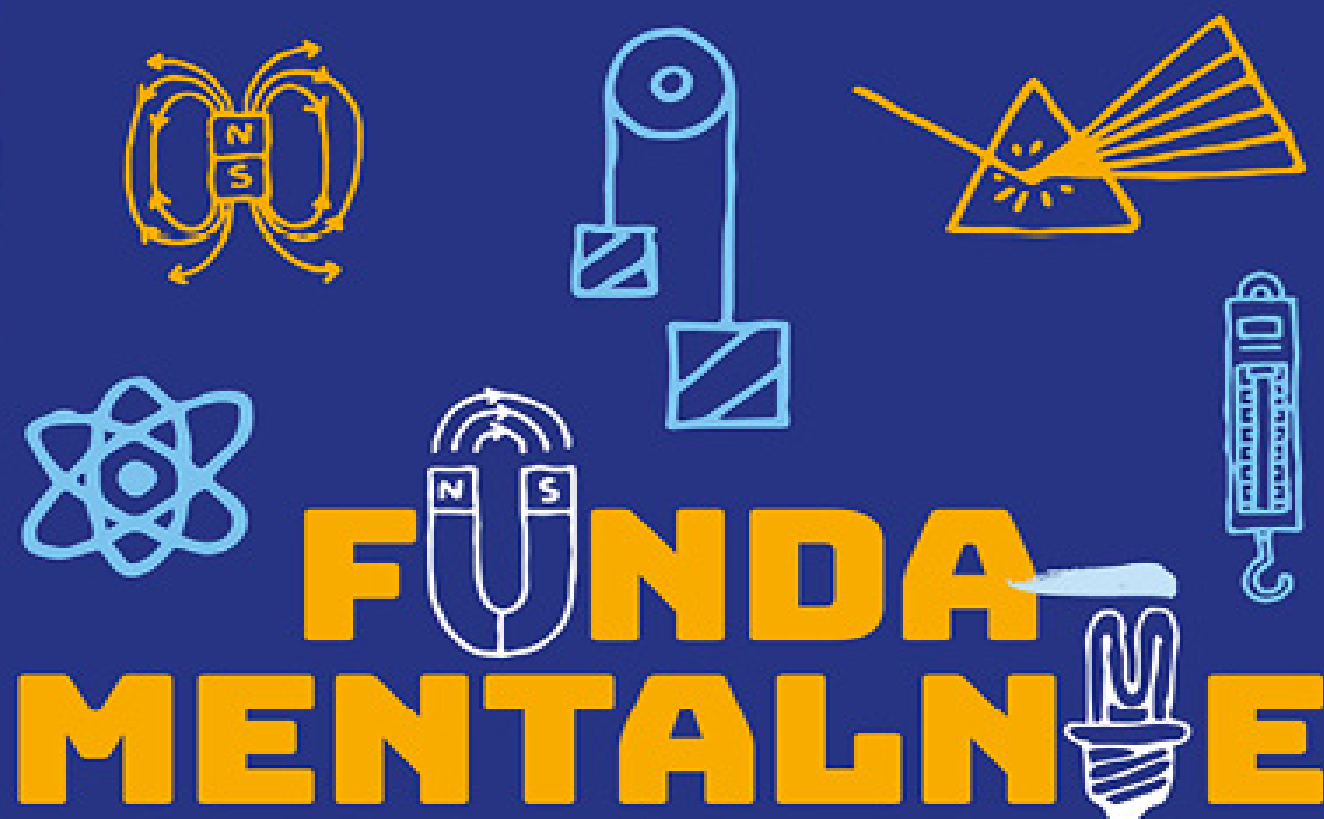
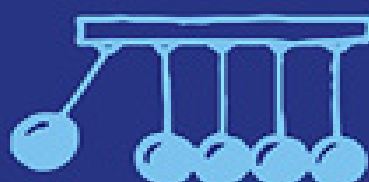


TIM JAMES



**Tak fizyka kwantowa
i fizyka cząstek elementarnych
wyjaśnia wszystko
(oprócz grawitacji)**

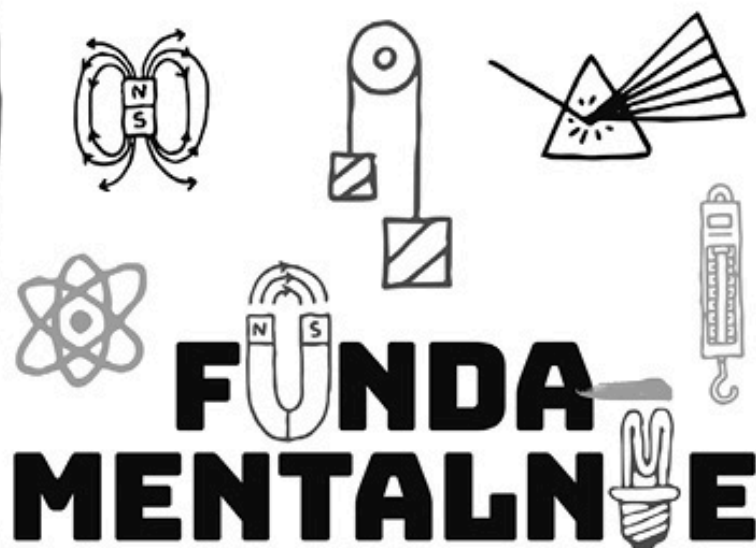
$$E=mc^2$$



$$F=ma$$

Prószyński i S-ka

TIM JAMES



**Tak fizyka kwantowa
i fizyka cząstek elementarnych
wyjaśnia wszystko**

(oprócz grawitacji)

Przełożył
TOMASZ KRZYSZTOŃ

$$E=mc^2$$



$$F=ma$$

Prószyński i S-ka

Tytuł oryginału
FUNDAMENTAL
How Quantum and Particle Physics
Explain Absolutely Everything (except gravity)

Copyright © 2019 by Tim James
All rights reserved

Projekt okładki
Paweł Panczakiewicz
www.panczakiewicz.pl

Redaktor prowadzący
Adrian Markowski

Redakcja
Anna Kaniewska

Korekta
Małgorzata Denys

ISBN 978-83-8097-823-2

Warszawa 2020

Wydawca
 Prószyński Media Sp. z o.o.
02-697 Warszawa, ul. Rzymowskiego 28
www.proszynski.pl

*Dedykuję uczniom
Northgate High School*

Bez względu na zapewnienia naukowców przyroda zawsze płata nam figle.

Isaac Asimov, *Nemesis*^{[1](#)}

^{[1](#)} Przeł. J. Polak, Kantor Wydawniczy SAWW, Poznań 1999, s. 265.

Wstęp

Koniec

Natura szaleje. Gdy dojdziemy do podstawowych praw fizyki, do samego fundamentu, znajdziemy się w domenie szaleństwa i chaosu, w której wiedza i wyobrażenia stają się jednością.

Oczywiście nie powinno to być zaskoczeniem, w przeciwnym razie bowiem musielibyśmy zakwestionować rozsądek natury dopuszczającej istnienie stworzeń takich jak rozgwiezdy. Nawet jednak jeśli jesteście przygotowani na dziwactwa natury, to i tak fizyka kwantowa z pewnością was zaskoczy.

Powstała ona pod koniec XIX wieku, gdy wszyscy uczeni byli z siebie zadowoleni. Do tego czasu wyznaczono już dokładną mapę gwiazd na niebie, wyodrębniono DNA, a za kilka lat miało dojść do rozbicia atomu. Wiedza wydawała się niemal zupełna i wszyscy byli przekonani, że za chwilę nastąpi wielki finał ludzkich osiągnięć: koniec nauki.

Pozostało oczywiście kilka dziwacznych zagadek naukowych, których nikt dotąd nie rozwiązał, takie tam drobne ciekawostki, zwisające jak luźne nitki z gobelinu. Gdy jednak za nie pociągnięto, cały obraz, który był tkany przez wieki, rozpadł się i stanęliśmy wobec nowej rzeczywistości. Rzeczywistości kwantowej.

Richard Feynman, laureat Nagrody Nobla, rozpoczął kiedyś serię swych wykładów stwierdzeniem: „Nie rozumiem tego moi studenci fizyki. Sam tego nie rozumiem. Nikt tego nie rozumie”². Te wywołujące refleksję słowa wypowiedział jeden z największych fizyków kwantowych. Ostatecznie jeśli ktoś tak błyskotliwy jak

Feynman nie jest w stanie tego zrozumieć, to jaką szansę ma na to każdy z nas śmiertelników?

Trzeba jednak zdawać sobie sprawę z tego, że Feynman nie twierdził, iż fizyka kwantowa jest zbyt skomplikowana, aby ją zrozumieć. Mówił tylko, że fizyka kwantowa jest tak okropnie uduziwniona.

Przypuśćmy, że ktoś nas poprosi, abyśmy wyobrazili sobie czteroboczny trójkąt lub wymyślili liczbę mniejszą od dziesięciu, ale większą od miliarda. Podobne polecenia nie są skomplikowane, ale nie można ich wykonać, ponieważ są bezsensowne. Tak też na pierwszy rzut oka będzie wyglądać nasza podróż w świecie kwantów.

To właśnie jest świat czterobocznych trójkątów i liczb, które nie spełniają zwykłych reguł. To miejsce, w którym na każdym kroku czają się wszechświaty równoległe i paradoksy, a przedmioty nie muszą zważać na przestrzeń ani czas.

Niestety, nasze mózgi nie nawykły do tego rodzaju szaleństwa, a słowa, które znamy, nie są na tyle dziwne, aby uchwycić naturę taką, jaka jest. Dlatego też fizyk Niels Bohr stwierdził, że gdy mamy do czynienia z fizyką kwantową, „język naturalny może wyrażać tylko poezję”³.

Najczęściej popełnianym błędem jest uznanie tego wszystkiego za zbyt trudne i w rezultacie przekonanie, że nie da się tego zrozumieć, ale się nie przejmujemy. Szczerze mówiąc, jeżeli wam ta dziedzina wyda się dziwaczna i niepokojąca, to wiedz, że największe umysły w historii miały podobne odczucia.

² R.P. Feynman, *QED: osobliwa teoria światła i materii*, przeł. H. Białkowska, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001, s. 18.

³ S. Giles, *Theorising Modernism: Essays in Critical Theory*, Routledge, Londyn 1993.

Rozdział 1

Pałając dumą

Trochę o historii światła

Fizyka kwantowa zaczęła się od próby zrozumienia światła, czegoś, co od tysiącleci trudno pojąć naszemu kolektywnemu umysłowi. Grecki filozof Empedokles żyjący około V wieku p.n.e. był pierwszym, który starał się stworzyć teorię tego, czym jest światło.

Wierzył, że ludzkie oko zawiera magiczny kamień ognisty, który wytwarza promienie rozświetlające to, na co patrzymy⁴. To pomysł zaiste poetycki, ale oparty na błędnym rozumowaniu: jeśli nasze oczy wytwarzają światło, to powinniśmy zawsze widzieć w ciemności, ponieważ same oczy są pochodniami.

Empedokles dał nam również obaloną teraz ideę czterech pierwiastków (ognia, wody, wiatru i ziemi), z których zbudowana jest materia, a także próbował wyjaśnić różnorodność biologiczną jako wynik pełzania po całym świecie bezcielesnych kończyn, które w końcu losowo łączą się, tworząc zwierzęta.

Tak naprawdę w historii nauki dokonania Empedoklesa polegały na wymyślaniu zbikowanych koncepcji, które wszystkie okazały się błędne, chociaż w odniesieniu do promieni świetlnych uświadomienie sobie jego błędu zajęło około tysiąca trzystu lat.

Błąd w rozumowaniu Empedoklesa udowodnił dopiero arabski uczony Alhazen. Przeprowadził on eksperyment z gałką oczną świni i wykazał, że podobnie jak w ciemnym pomieszczeniu, światło odbija

się w jej wnętrzu, tzn. dociera z otaczających nas obiektów, a oczy po prostu przechwytyują te promienie⁵.

Może się wydawać dziwne, że musiało upłynąć ponad tysiąc lat, abyśmy stwierdzili, że nasze oczy nie wystrzeliwiają magicznych promieni lasera, ale były to zupełnie inne czasy. Zakładano wówczas, że to ludzie nadawali przedmiotom cel istnienia, a więc nie musiały mieć one wyglądu, gdy na nie nikt nie patrzył.

Na szczęście stopniowo akceptowano sugestię Alhazena, że eksperyment powinien przeważać nad ludzkim ego, a światło pochodzi od samych przedmiotów i wpada do naszych oczu w formie promieni biegnących po liniach prostych. Teraz czas na renesans.

Prawdopodobnie najbardziej wpływowym renesansowym uczonym/filozofem był Kartezjusz (René Descartes), który miał kolejny wielki pomysł na fizykę światła.

Zauważył mianowicie, że kiedy świeca jest zapalona, oświetlenie może jednocześnie dotrzeć do każdego rogu pokoju, tak jak zaburzenie wywołane w centrum stawu dociera do każdego brzegu w tym samym czasie. Światło, jak mniemał, jest zjawiskiem podobnym. Istnieje niewidzialna materia rozciągająca się w każdym kierunku, którą nazwał plenum, a światło to rozchodzące się w nim falki i fale⁶.

Jedynym uczonym, który nie zgodził się z jego pomysłem fal rozchodzących się w plenum, był Isaac Newton, który nigdy nie zgadzał się z kimś, kogo uważał za mniej inteligentnego (czyli w zasadzie ze wszystkimi).

Newton zwrócił uwagę na to, że jeśli światło jest falą w medium, to podczas przechodzenia obok obiektów powinno ono ulegać zagięciu, tak jak wokół skały ugina się fala na wodzie. Dałoby to cienie rozmywające krawędzie obiektu, ale ponieważ są one ostro widoczne, to bardziej sensownie jest myśleć o świetle jako o tworze składającym się z cząstek, które nazwał „korpuskułami”⁷.

Dlatego zamiast fal Kartezjusza rozchodzących się w plenum została zaakceptowana korpuskularna teoria światła Newtona. Głównie z tego powodu, że cieszył się on statusem celebryty i tyranizował każdego, kto miał inny pogląd.

Newton byłby zatem zdumiony, gdyby dowiedział się o wyniku eksperymentu przeprowadzonego przez Thomasa Younga, którym dowiódł on czegoś wręcz przeciwnego. Eksperyment ten Young wykonał siedemdziesiąt lat po śmierci Newtona. Potem zaś przeprowadził zaledwie kilka następnych doświadczeń.

Utalentowany pan Falka

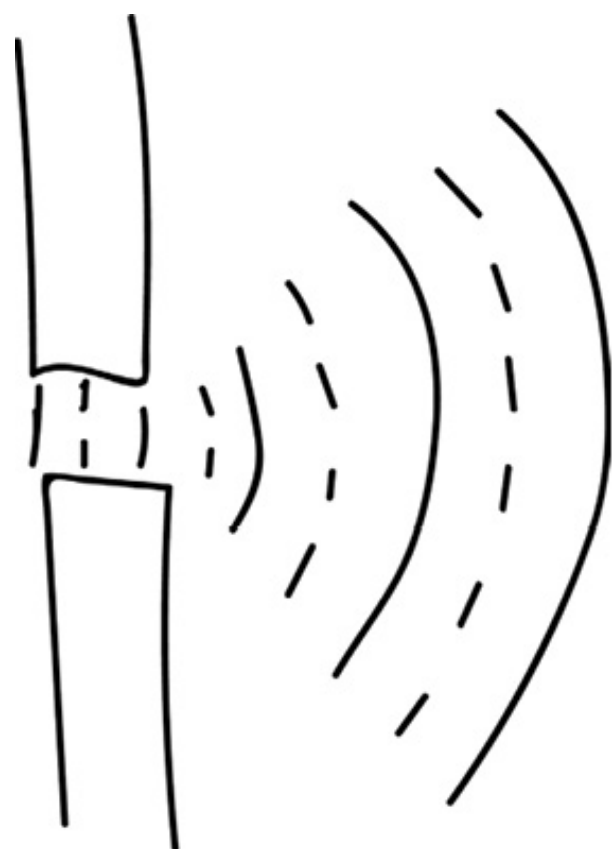
Thomas Young wyróżniał się w XVIII wieku jednym z najbardziej niezwykłych umysłów. Jest dobrze znany jako tłumacz tekstu wyrytego na kamieniu z Rosetty i tym samym był pierwszym człowiekiem nowoczesnej ery, który przyczynił się do rozszyfrowania egipskich hieroglifów⁸. Odkrył również receptory kolorów w naszych oczach, napisał kilka książek medycznych, posługiwał się biegle czternastoma językami, grał na dwunastu instrumentach i rozwinął współczesną teorię sprężystości⁹.

Swój eksperyment, który istotnie wywołał zafalowania w teorii światła (zamierzona gra słów), znany jako eksperyment z podwójną szczeliną, wykonał w 1803 roku.

Wróćmy na chwilę do przykładu fal rozchodzących się po powierzchni stawu. Wyobraźmy sobie regularny impuls wywołujący na spokojnej powierzchni wody fale, które następnie przechodzą przez przegrodę mającą jedną szczelinę. Fale te przedostają się na drugą stronę szczeliny i dalej rozchodzą się od niej promieniście – jest to proces nazywany dyfrakcją.

Przyczyną rozchodzenia się fali za szczeliną tak samo jak ze źródła jest to, że czoło fali padającej na szczelinę rozprasza swoją energię do otaczającej wody. Patrząc z góry, otrzymujemy wzór wyglądający jak na rysunku obok, gdzie szczyty fal są liniami ciągłymi, a ich doliny liniami przerywanymi:

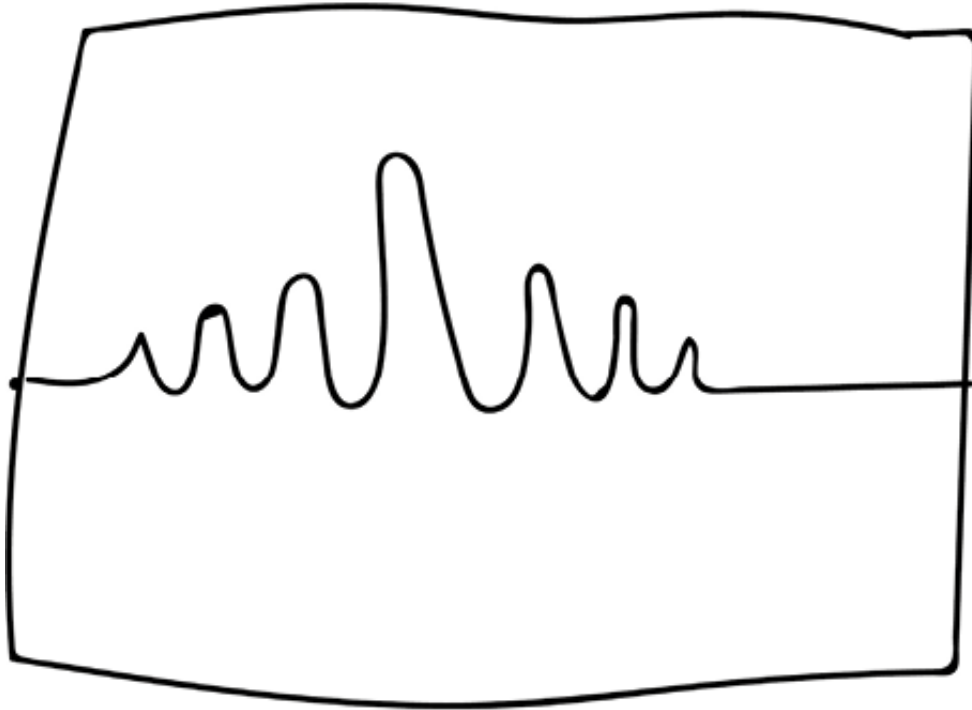
A teraz rozpatrzmy przypadek, gdy w przegrodzie pojawiają się dwie szczeliny. Zachodzi to samo zjawisko, tyle że tym razem dwie fale doznają dyfrakcji jednocześnie, nakładają się na siebie i mieszają razem. Gdy patrzymy z góry, wygląda to tak jak na rysunku:





W niektórych miejscach widać, jak szczyt jednej fali spotyka się ze szczytem drugiej, prowadząc do powstania na powierzchni wody wzmocnionego szczytu. Pomędzy tymi wzmocnionymi szczytami otrzymujemy efekt przeciwny, gdy fale nie są zsynchronizowane, a szczyt jednej fali napotyka dolinę drugiej. W tych miejscach fale znoszą się i nie pojawia się zjawisko falowania.

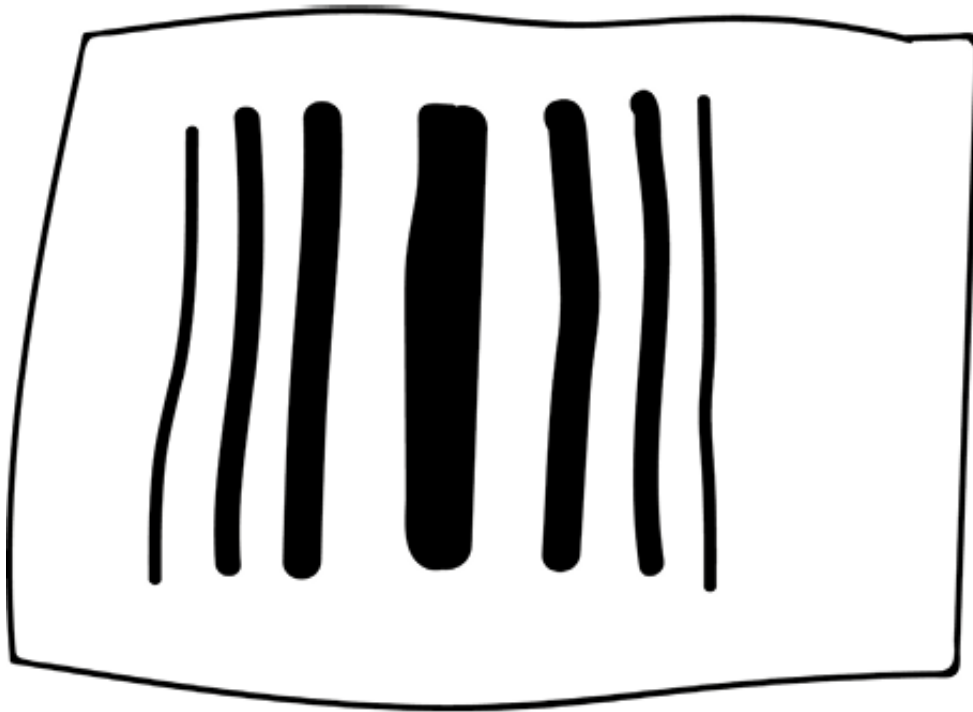
Gdybyśmy teraz umieścili ekran na końcu stawu, to zmieszane fale uderzałyby weń naprzemiennie wzmocnionymi szczytami i obszarami, w których nie występuje efekt falowania. Jeśli patrzymy na ten ekran od przodu (a nie z góry w dół), to wzór pozostawiony przez fale wygląda tak:



Widzimy tutaj efekt interferencji fal, które ulegając dyfrakcji na podwójnej szczelinie, tworzą po drugiej stronie przegrody wzorec naprzemiennie wysokiej i niskiej amplitudy fali. Zjawisko to nazywamy „superpozycją” fal.

Thomas Young odtworzył ten wzorec superpozycji fal, tyle że za pomocą promieni świetlnych zamiast wody. Po ustawieniu świecy za przegrodą mającą dwie szczeliny Young otrzymał na ekranie umieszczonym po drugiej stronie przegrody wzorec naprzemiennych prążków światła i cienia, podobny do tego tworzonego przez superpozycję fal na wodzie (patrz strona obok).

Gdyby światło składało się z cząstek, jak twierdził Newton, to powinny one przelatywać przez dwie szczeliny i uderzając w ekran po drugiej stronie, tworzyć jedną dużą plamę. Wzorec prążków, jak u zebry, który otrzymujemy, można wytłumaczyć tylko wtedy, gdy przyjmiemy, że światło ma charakter fali.



Zastrzeżenia Newtona co do krawędzi obiektów nadal miały wpływ na uczonych, natomiast po jego śmierci kilku badaczy odważyło się zakwestionować ów pogląd. Gdy przyjrzeć się z bardzo bliska granicy cienia, to rzeczywiście można zobaczyć niewyraźną krawędź: to bardzo słaby efekt i po prostu łatwo go przeoczyć. Nie można tego wyjaśnić za pomocą cząstek światła, ale można uznać za skutek ugięcia fali świetlnej na krawędziach obiektu.

Medium, w którym rozchodziły się te fale, nazwane przez Kartezjusza plenum, otrzymało teraz bardziej wyszukaną nazwę, świetlistego eteru, i tym samym natura światła została ostatecznie ustalona.

Pomysł Kartezjusza zdecydowanie wyprzedzał swoje czasy, ale nie został przyjęty dopóty, dopóki nie pojawił się dowód eksperymentalny. To mocne przypomnienie, że nie można stawiać Kartezjusza przed koniem. Trochę mi przykro z powodu tego żartu. Tylko trochę.

Katastrofa stulecia

Pod koniec XIX wieku nikt już nie kwestionował tego, czym jest światło, wyjaśniała to bowiem teoria Younga. Pozostało jednak kilka faktów, które nie pasowały do ogólnego obrazu. Najbardziej znanym było zjawisko oddziaływania światła z obiektami gorącymi i w celu wyjaśnienia tej zagadki musimy się na chwilę zająć gumowymi węzami ogrodowymi.

Wyobraźmy sobie szlauch, którego wylot jest podłączony do dna pojemnika na wodę. Kiedy włączymy wodę, pojemnik stopniowo nią się napełni aż do pełna i dalej już nie będzie się napełniał. Załóżmy jednak, że zrobimy trzy otwory w pokrywie pojemnika – pierwszy mały, drugi średni i trzeci duży.

Gdy tym razem wpuścimy wodę, wypełni ona jak zwykle pojemnik, ale potem zacznie się wylewać dziurami w pokrywie. Najwięcej będzie jej wyciekać z największego otworu, a najmniej z małego. Bez sensu byłoby budować takie urządzenie, ale nie dzieje się w nim nic trudnego do zrozumienia. Wpompowujemy wodę od dna, a z dziur na wierzchu ona się wylewa.

Jest to dość dobry sposób wizualizacji tego, że obiekt świeci, gdy staje się bardzo gorący. Jeśli dowolny przedmiot się ogrzewa, to pochłania coraz więcej energii cieplnej. W pewnym momencie, gdy zbierze się jej wystarczająco dużo, energia zaczyna z niego wyciekać w postaci światła.

W tej analogii szlauch ogrodowy jest metodą wprowadzania energii cieplnej do ciała, a wyciekająca otworami woda będzie wyobrażeniem różnych rodzajów światła, które z ciała mogą być emitowane. Najmniejszy otwór to podczerwień (która ma za małą energię, aby ją widzieć), środkowy otwór symbolizuje zakres widzialny (od czerwieni do fioletu), a największy – ultrafiolet (mający zbyt wielką energię, aby go zobaczyć).

Ciemne obiekty najskuteczniej przetwarzają ciepło w światło, ponieważ pochłaniają całą padającą na nie energię i dlatego wyidealizowane ciało doskonale pochłaniające ciepło nazywane jest w żargonie fizycznym „ciałem doskonale czarnym” (nawet jeśli nie jest to dosłownie obiekt czarny).

Całe zjawisko jest zadowalająco opisane prostym równaniem wyrażającym prawo Rayleigha–Jeansa i w niskich oraz

umiarkowanych temperaturach może być ono dobrym przybliżeniem rzeczywistości, ale kiedy robi się naprawdę gorąco, dzieje się coś bardzo dziwnego.

Logicznie rzecz biorąc, większość energii świetlnej emitowanej z gorącego ciała powinna mieścić się w zakresie ultrafioletu, ponieważ jest to światło o najwyższej energii (największa dziura w naszym pojemniku na wodę). Jednak tak naprawdę lwią część emitowanego światła zawiera się w zakresie średnich wartości energii.

Otrzymujemy trochę podczerwieni i trochę ultrafioletu, ale większość światła emitowanego z gorącego ciała pochodzi z zakresu żółtopomarańczowego, a to nie ma sensu. To tak, jakby prawie cała woda z napełnianego pojemnika wypływała przez otwór środkowy, a nie ten największy.

W rzeczywistości sytuacja jest jeszcze bardziej dziwna niż ta trójotworowa analogia, ponieważ realne światło może mieć dowolną energię i nie istnieje ograniczenie tylko do trzech zakresów. Dokładniej moglibyśmy tę sytuację wyobrazić sobie jako szczelinę wyciętą w poprzek górnego wieka pojemnika i wodę wyciekającą głównie środkiem szczeliny, zamiast płynąć równomiernie środkiem i krawędziami.

Paul Ehrenfest opisał tę zagadkę jako „katastrofę w ultrafiolecie”¹⁰ i odtąd w literaturze fizycznej zjawisko to znane jest pod nazwą „katastrofy ultrafioletowej”.

W tej sytuacji mamy do czynienia z niedopasowaniem teorii do eksperymentu, a w nauce to zawsze teoria musi zgadzać się z eksperymentem, a nie odwrotnie. Eksperymentowi nie można narzucić wyników, jeśli więc twoja teoria nie daje wyników, które faktycznie otrzymujesz w eksperymencie, to żegnasz się z taką teorią.

Najwyraźniej mieliśmy jakieś błędne wyobrażenie o tym, czym jest energia świetlna, i dlatego pojawiła się ta katastrofa, ale nikt nie mógł przewidzieć, że niewielka korekta idei jej dotyczących doprowadzi do rewolucji kwantowej. Człowiek, który wpadł na rozwiązanie, nie próbował bowiem dokonać niczego aż tak radykalnego. Chciał tylko energooszczędnej żarówki.

Zanim Planck stał się kimś

Max Planck był najmłodszym z sześciorga rodzeństwa i ukończył szkołę średnią w 1875 roku, rok przed swoimi kolegami z klasy. Złożył podanie o przyjęcie na studia fizyczne na Uniwersytecie Monachijskim, ale profesor Philipp von Jolly, który decydował o przyjęciu, próbował go zniechęcić, ponieważ w jego mniemaniu prawie wszystkie zagadnienia fizyczne zostały już rozwiązane, dlatego studiowanie ich byłoby marnotrawstwem intelektu Plancka¹¹.

Pomimo że von Jolly bardzo poważnie traktował swój pogląd na fizykę, Planck nie dawał za wygraną i nalegał, aby pozwolono mu studiować to, co chciał. Nie obchodziło go, czy odkryje coś nowego, ponieważ nie interesowała go naukowa chwała. Chciał tylko zrozumieć, jak działa świat, i nie przyjmował odmowy. Nie ugiął się.

Von Jolly był pod takim wrażeniem jego uporu, że zdecydował się jednak przyjąć Plancka i wkrótce stał się on jedną z najbardziej szanowanych postaci w europejskich kręgach fizyków. Podobno jego wykłady były tak popularne, że słuchacze stali w ścisiku, by go usłyszeć, a gdy ktoś mdlał z powodu upału lub innych przyczyn, inni to ignorowali, aby tylko Planck mógł dokończyć to, o czym mówił.

To właśnie jego reputacja zwróciła uwagę zwierzchników niemieckiego Urzędu Miar, którzy poprosili go o pomoc przy zakładaniu w Niemczech elektrycznego oświetlenia ulic. W innych krajach elektryczność stanowiła już ostatni krzyk mody, ale była też kosztowna i urzędnicy chcieli się dowiedzieć, jak najefektywniej rozwiązać to zagadnienie. Planck chętnie przyjął zaproszenie i przystąpił do pracy nad analizą zależności między wydzielanym z rozgrzanej żarówki ciepłem i światłem¹².

Żarnik żarówki w przybliżeniu można uważać za „ciało doskonale czarne”. Podczas ogrzewania się od wewnątrz jego zewnętrzna powierzchnia absorbuje całą energię cieplną i emituje ją w postaci światła, głównie z zakresu widzialnego. W miarę jak żarnik się nagrzewa, nie emituje jednak tego zakresu światła, jaki przewiduje prawo Rayleigha–Jeansa. Planck zatem postanowił wymyślić nowe prawo, takie, w którym energię świetlną potraktował jako pewien rodzaj gazu.

W gazie cząstki poruszają się chaotycznie i wymieniają między sobą energią w czasie zderzeń. Losowo niektóre cząstki mają niską energię, a inne wysoką, ale większość z nich ma energię o wartości średniej – i tę średnią energię gazu nazywamy jego temperaturą.

Planck zdał sobie sprawę, że taki rozkład energii odpowiada temu, co obserwował w swoich eksperymentach z żarówkami. Gdy ogrzewamy obiekt, energia emitowanego światła rozkłada się wokół wartości średniej, a tylko niewielka liczba wiązek promieni świetlnych ma energię z górnego i dolnego krańca widma. Planck zaproponował zatem, aby energia była dzielona pomiędzy promienie światła w ten sam sposób, w jaki ciepło jest dzielone pomiędzy cząsteczki w gazie.

Jedynym problemem jest to, że zjawisko rozchodzenia się ciepła w gazach powstaje w wyniku tego, iż gaz składa się ze swobodnych cząsteczek. Aby pomysł Plancka zadziałał, światło musiałoby być również gazem cząsteczek.

Te małe cząsteczki światła nazwał on „kwantami” od łacińskiego słowa *quantitas*, co oznacza ilość, i kontynuował swoją pracę bez przeszkód.

Żeby było jasne, Planck nie twierdził, że światło składa się z cząsteczek – to byłoby przecież absurdem. Po prostu w akcie desperacji zastosował sprytną matematyczną sztuczkę, aby jego wyniki miały jakiś sens. Oczywiście wszyscy mieli wynikającą z eksperymentu Younga świadomość, że przecież światło to fala poruszająca się w świetlistym eterze. A o idei Newtona, o korpuskularnej naturze światła, zapomniano już dawno temu.

Nawet sam Planck nie traktował kwantów świetlnych zbyt poważnie. Dlatego był oszołomiony, kiedy otrzymał artykuł naukowy udowadniający, że jego założenie okazało się prawdziwe. Po prostu zdębiał.

⁴ A. Marmodoro, *Aristotle on Perceiving Objects*, Oxford University Press, Oksford 2014.

⁵ J. Gribbin, M. Gribbin, *Science: A History in 100 Experiments*, William Collins, Londyn 2016.

⁶ E. Zalta, *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (22 sierpnia 2017 r.), dostępne w: <https://plato.stanford.edu/entries/descartes-physics/> (dostęp 15 grudnia

2018 r.).

[7](#) I. Newton, *Opticks* (1704, reprint: Dover Publications, Nowy Jork 1952).

[8](#) Hieroglify odczytał Jean-François Champollion w 1822 r. Young w 1814 r. wniósł duży wkład w odczytanie pisma demotycznego (przyp. tłum.).

[9](#) A. Robinson, *The Last Man Who Knew Everything*, Oneworld Publications, Londyn 2006.

[10](#) P. Ehrenfest, *On the Necessity of Quanta* (1911), tłum. L. Navarro i E. Perez, „Archive for History of Exact Sciences” 2004, t. 58, s. 97–141.

[11](#) A. Lightman, *The Discoveries*, Vintage, Nowy Jork 2006.

[12](#) E. Cartmell, G. Fowles, *Valency and Molecular Structure*, wyd. czwarte, Butterworths, Londyn 1977.

Rozdział 2

Kawałki

Doktor Whom?

Do 1905 roku Planck w dużej mierze zdążył już zapomnieć o swoim pomysle, o tym, że światło zbudowane jest z cząstek. Był redaktorem naczelnym „Annalen der Physik”, jednego z najbardziej prestiżowych czasopism fizycznych o zasięgu światowym. Praca w takim charakterze oznaczała, że otrzymywał w swej codziennej poczcie wiele fałszywych z punktu widzenia fizyki pomysłów, które w większości odrzucał.

Autor pewnego artykułu z marca 1905 roku, który początkowo potraktował jako kolejny szalony pomysł, twierdził, że światło naprawdę składa się z cząstek, i nie była to tylko sztuczka wprowadzona po to, aby liczby się zgadzały. Pracę przysłał nieznany dwudziestosześcioletni fizyk, naukowiec amator ze Szwajcarii, który nie mógł pochwalić się niczym więcej niż kwalifikacjami do nauczania w szkole średniej. Jednak fizyka w jego artykule była nie tylko bezbłędna, lecz także rozwiązywała kolejną zagadkę, nad którą uczeni pracowali od lat.

Planck na początku nie mógł w to uwierzyć, a nawet wysłał swojego asystenta do Szwajcarii, aby ten sprawdził, czy jakiś „A. Einstein” naprawdę istnieje, czy nie jest to ktoś piszący pod pseudonimem po to, aby uniknąć kompromitacji¹³. Kiedy odkrył, że Einstein jest w rzeczywistości tym, za kogo się podaje (choć dość niedoświadczonym – bo nie miał nawet doktoratu), Planck najpierw

opublikował swój artykuł. Być może jego absurdalny pomysł na kwanty światła nie był aż tak absurdalny.

Praca Einsteina dotyczyła czegoś, co nazywa się efektem fotoelektrycznym. Mówiąc wprost: kiedy światło pada na czysty kawałek metalu, elektrony z zewnętrznych warstw chmur elektronowych atomów metalu mogą się z nich uwolnić i wylecieć przez powierzchnię metalu.

Dzieje się tak, gdyż elektrony pochłaniają światło, a jeśli padająca wiązka światła ma wystarczająco dużą energię, elektron może ją pochłonąć i uwolnić się z chmury. Samo zjawisko nie było aż tak zaskakujące, zaskoczyło natomiast to, że nie każdy kolor światła sprawiał, że tak się działo.

Każdy metal ma unikatowe cechy, ale ogólnie rzecz biorąc, światło czerwone, pomarańczowe i żółte nie wytrąca elektronów z powierzchni metalu, podczas gdy światło zielone, niebieskie i fioletowe powoduje emisję elektronów. Światło zielone, niebieskie i fioletowe odznacza się większą energią niż czerwone, pomarańczowe i żółte, ma to więc sens, ale dziwne jest to, że jeśli zwiększymy natężenie światła czerwonego (nawet do takiej jego energii na powierzchni metalu, że będzie równa energii światła niebieskiego), to nic się nie dzieje.

Energię kwantów mierzymy w jednostkach zwanych elektronowoltami (eV) i czerwone światło o energii 10 eV zawiera taką samą ilość energii jak światło niebieskie o energii 10 eV. Jak to się więc dzieje, że światło czerwone i niebieskie o tej samej energii nie powoduje identycznego efektu? Czy 10 eV światła czerwonego nie jest takie samo jak 10 eV światła niebieskiego? Einstein wykazał, że jeśli potraktować teorię kwantów Plancka poważnie, to nie jest. Dziesięć nie zawsze równa się dziesięć.

Jabłko w dłoni warte jest dwóch Nagród Nobla

Wyobraź sobie, że ktoś trzyma jabłko w wyciągniętej ręce. Jeśli psikniesz w jabłko z pistoletu na wodę (nie pytaj, dlaczego tak wyglądają analogie w fizyce), to pozostanie ono w dłoni, o ile nie

wytworzysz na tyle potężnego strumienia wody, że jego energia pokona siłę uchwytu. Wówczas jabłko wyleci z dłoni w powietrze.

Podobnie elektron ma pewną energię wiązania ze swoim atomem i w miarę jak zwiększamy jasność padającego nań światła, powinniśmy w końcu wybić go z atomu, bez względu na kolor padającego światła. Nie otrzymujemy jednak takiego rezultatu w laboratorium, po raz kolejny więc musimy porzucić naszą teorię i spróbować czegoś nowego.

Weźmiemy pod uwagę czerwony promień światła i wyobraźmy sobie zgodnie z sugestią Plancka, że składa się on z małych cząstek o określonej ilości energii. Niebieski promień może być także złożony z takiej samej liczby cząstek, ale oczywiście, każda z nich będzie miała większą energię.

Zamiast myśleć o energii świetlnej jak o gładkim strumieniu wody, musimy uznać ją za strumień cząstek. Kwanty czerwonego światła przypominałyby coś w rodzaju piłeczek pingpongowych. Jeśli wystrzelisz w jabłko piłeczkę pingpongową, to nie ruszy się ono, nawet gdy zwiększysz intensywność wystrzałów. Możesz wystrzelić w swojego ochotnika całe wiadro piłeczek pingpongowych, ale ponieważ każde oddziaływanie piłeczki z jabłkiem jest bardzo słabe, nigdy się ono nie przemieści, bez względu na to, ile uderza w nie cząstek światła.

W przeciwieństwie do powyższego kwant niebieskiego światła przypomina bardziej kulę armatnią. Jeśli wystrzelić pojedynczą niebieską cząstkę w trzymane jabłko, to rozbije ona owoc i prawdopodobnie również trzymającą je rękę. Zatem dokonaj rozsądnego wyboru swego ochotnika.

Sto piłek do ping-ponga może mieć sumarycznie taką samą energię jak pojedyncza kula armatnia, ale uderzenie kuli armatniej wywrze z pewnością większy skutek. Dlatego też nie ma znaczenia całkowita energia wiązki światła, jeśli jest ona rozdzielona pomiędzy cząstki; liczy się tu tylko kolor. I to jest to, co obserwujemy.

Według Einsteina kwantowa teoria światła Plancka jest fizycznie realna. To nie jest założenie przybliżające nas do rozwiązania, ale właśnie rozwiązanie. Światło ostatecznie składa się z cząstek. Wkrótce po dowodzie Einsteina chemik Gilbert Lewis wymyślił, że

cząstki te powinny mieć bardziej chwytliwą nazwę niż „kwanty światła”, i zaczął używać określenia foton (z greckiego „światło”), które się przyjęło¹⁴.

Za nowe podejście do fizyki światła zarówno Planck, jak i Einstein otrzymali Nagrody Nobla odpowiednio w 1918 i 1921 roku. Gilbert Lewis niestety jej nie dostał, ale miał niesamowite wąsy i przypisuje mu się wymyślenie powiedzonka „chwilka”¹⁵, w pewnym sensie więc każdy został zwycięzcą.

Co... Einstein? Mamy zatem problem

Kiedy Einstein udowodnił, że światło składa się z cząstek, nie było to tylko potwierdzeniem kwantowej teorii Plancka, ale stało się również zaprzeczeniem fal świetlnych Younga.

Z jednej strony efekt fotoelektryczny i katastrofę nadfioletową można było wyjaśnić tylko wtedy, gdy światło składało się z cząstek. Z drugiej strony eksperyment z podwójną szczeliną wskazywał, że światło musi być falą w jakimś ośrodku stanowiącym tło.

Kiedy następuje zderzenie dwóch konkurujących ze sobą hipotez, naukowcy starają się rozwiązać rozbieżności, wykonując eksperymenty w celu ich potwierdzenia lub obalenia. Ale co zrobić w imię chrupiącego jabłko ducha Newtona, gdy doświadczenia są ze sobą sprzeczne? Była to bezprecedensowa sytuacja dla nauki, musiano więc znaleźć jakieś wyjście z tej sytuacji.

Może moglibyśmy wyjaśnić wyniki eksperymentu Younga z podwójną szczeliną za pomocą fotonów? Może źródło światła rozpyla je podobnie do karabinu maszynowego, a one zderzają się w powietrzu, tworząc na ekranie wzór prążków jak u zebry?

Najlepszym sposobem na potwierdzenie tego faktu byłoby wyeliminowanie możliwości wzajemnego oddziaływania fotonów podczas przelotu przez podwójną szczelinę. Zamiast rozpylać wszystkie naraz, powinniśmy spróbować wystrzeliwać je pojedynczo, nie tak jak z karabinu maszynowego, ale jak z karabinu snajperskiego.

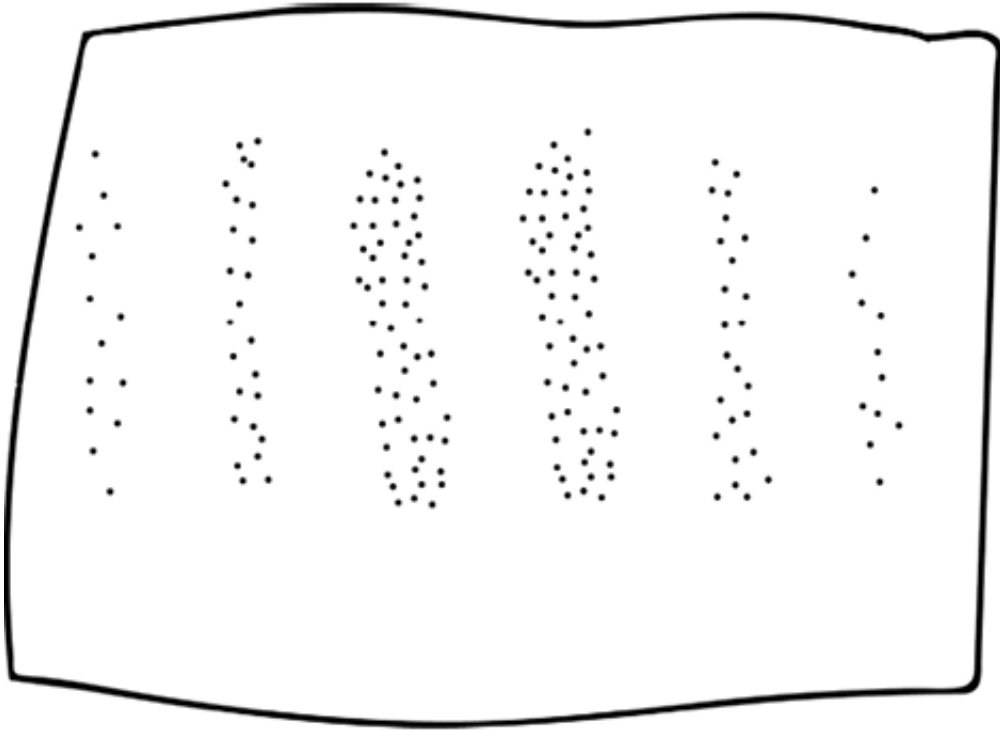
Na przestrzeni lat opracowano wiele wersji tego eksperymentu, ale najlepsza okazała się ta przeprowadzona przez Akirę Tonomurę w 1994 roku, podczas gdy pracował dla koncernu Hitachi¹⁶. W tej samej firmie, która produkuje czołgi, lodówki i wibratory, wykonano również najbardziej precyzyjny eksperyment z podwójną szczeliną.

Szczegóły eksperymentu Tonomury są zupełnie inne niż tego, który wykonał Thomas Young, ale został osiągnięty ten sam cel, zatem dla prostoty i wygody zamierzam użyć analogicznej terminologii, choć nie jest to tak proste, jak mam zamiar przedstawić.

W eksperymencie Tonomury emiter światła, strzelając fotonami w kierunku podwójnej szczeliny, mógł zmieniać jasność ich wiązki od wysokiej do niskiej. Po drugiej stronie ustawiono ekran detektora wykonany z materiału, który gdy uderzył weń foton, świecił, tworząc smugę światła.

Kiedy cała masa fotonów była wystrzeliwana w kierunku podwójnej szczeliny, tak jak to robił Young w swoim oryginalnym eksperymencie, Tonomura otrzymywał oczekiwany wzór prążków jak u zebry, ale kiedy wybrał intensywność strzałów wynoszącą jeden foton naraz, otrzymał w rezultacie coś bardzo dziwnego.

Przez pierwsze kilka minut nie wydarzało się nic ciekawego. Foton za fotonem był wystrzeliwany w kierunku podwójnej szczeliny i uderzał w ekran detektora pozornie przypadkowo. Jednak podczas obserwacji kropki zaczęły nagle tworzyć wzorzec wstążek jak ten na rysunku poniżej... Wygląda znajomo?



Nie powinno to być możliwe, ponieważ każda cząstka jest wystrzeliwana indywidualnie. Wzorec prążków zebry wymaga, aby foton przechodzący przez jedną szczelinę oddziaływał z innym fotonem pochodzącym przez drugą szczelinę. Jeśli każdy foton jest wystrzeliwany osobno, nie ma z czym oddziaływać. W jaki sposób fotony tworzą wzorek interferencji, gdy nie oddziałują ze sobą? Czy foton przechodzi jakoś przez obie szczeliny jednocześnie?

Kwantowe spodnie

Pamiętam, jak kiedyś wyciągnąłem z pralki spodnie od pizamy i jak bardzo byłem zdezorientowany, gdy zrozumiałem, że przecież w tym samym czasie mam je na sobie. Przez kilka sekund stałem oniemiały, wierząc, że jestem właścicielem kwantowych spodni, zdolnych do istnienia w superpozycji dwóch położeń.

Wówczas zwrócono mi uwagę, że przecież posiadam dwie pary takich samych spodni i po prostu nigdy wcześniej tego nie zauważałem. Na moją obronę mogę powiedzieć, że myślałem wtedy

o fizyce kwantowej, a w fizyce kwantowej nigdy nie chodzi o proste wyjaśnienie. Bo proste wyjaśnienie nigdy nie działa.

Eksperyment z podwójną szczeliną pokazuje, że światło może zachowywać się jak cząstka, gdy wylatuje z emitera, ale może zachowywać się jak fala, gdy przechodzi przez szczeliny.

W kategoriach „fizyki klasycznej” – fizyki Isaaca Newtona, w której wszystko zachowuje się rozsądnie – cząstki i fale to odrębne rzeczy. A teoria kwantowa zaczęła zacierać tę granicę.

Ziggy mówi, że jest to skomplikowane

Gdy Einstein odbierał swoją Nagrodę Nobla w Szwecji, młody duński fizyk i entuzjasta piłki nożnej¹⁷ Niels Bohr zastosował teorię kwantów do zbadania struktury atomów.

Atomy składają się z cząstek zwanych protonami, które skupiają się w centralnym jądrze, oraz elektronów, które latają na zewnątrz jak rój pszczoł wokół ula. (Uwaga: neutrony, które również znajdują się w jądrze, nie zostały w tym momencie jeszcze odkryte).

Wiadomo było, że światło emitowane z żarzącego się atomu ma unikatowe dla tego typu atomu wartości. Gorące żelazo emituje inne częstotliwości na przykład w odróżnieniu od niklu i odwrotnie, pochłania różne kolory światła nań padającego. Wcześniej było to trudne do wytłumaczenia, ponieważ światło uważano za substancję o naturze falowej, ale kiedy dowiedzieliśmy się, że wiązka światła może się składać z cząstek o określonej energii, to możliwe stało się wyjaśnienie jego oddziaływania z materią. Energie fotonów mają określone wartości, okazało się więc, że energie elektronów muszą mieć tę samą własność.

W kwantowej teorii atomu Bohra elektrony nie pędzą chaotycznie wokół jądra. Zamiast tego poruszają się po powierzchni niewidzialnych sfer w określonych odległościach od niego. Bohr nazwał te sfery „powłokami elektronowymi”, chociaż oczywiście powinien był nazwać je „bohrbitami”.

Atom Bohra był trójwymiarową wersją Układu Słonecznego i obraz ten jest do dziś popularny. Różnica między elektronami a planetami

polega jednak na tym, że planety mogą poruszać się wokół Słońca w dowolnej odległości. Grawitacja wywiera siłę w każdym punkcie przestrzeni i zmniejsza się płynnie podczas zwiększania odległości, zatem każda odległość na orbicie jest dozwolona, pod warunkiem że poruszasz się z odpowiednią prędkością, aby uniknąć wessania.

Kwantowe powłoki elektronów są inne. Elektrony nie mogą przyjmować dowolnej wartości energii, ponieważ energia jest podzielona na konkretne wartości (mówimy, że jest skwantowana).

Elektron o małej energii będzie przebywał na powłoce znajdującej się blisko jądra, ale jeżeli wchłonie foton, to dostanie impuls i może orbitować na powłoce odleglejszej. Ponieważ odległości pomiędzy powłokami są ustalone, dozwolone są tylko pewne przeskoki energetyczne, a więc tylko pewne częstotliwości światła będą oddziaływać z określonymi atomami.

Założmy, że odległość pomiędzy dwoma powłokami odpowiada skokowi energii o wartości 20 eV. Jeżeli elektron pochłonie foton o energii 20 eV, to może wykonać doskonały skok. Natomiast jeśli mielibyśmy wystrzelić w atom foton o energii 19 eV, to nic nie może się wydarzyć. Skok o wartości 19 eV nie jest dozwolony, foton więc przeleci przez atom tak, jakby atomu w ogóle nie było.

Oznacza to, że elektrony nie mogą mieć pośrednich wartości energii między powłokami. Kiedy więc elektron absorbuje foton i przechodzi do wyższej powłoki, nie pokonuje ziemi niczyjej pomiędzy powłokami. Wygląda na to, że przechodzi od powłoki wewnętrznej do zewnętrznej natychmiast, podczas aktu zwanego „skokiem kwantowym”. Nie mówię, że elektrony teleportują się między powłokami, ale wygląda na to, że analogia jest niezwykle trafna.

Podczas skoku kwantowego elektron znika z jednej powłoki i pojawia się na kolejnej, jednocześnie pochłaniając w tym akcie foton (jeśli zyskuje energię) lub emitując go (jeśli traci). Jak na ironię termin „skok kwantowy” w codziennym użyciu oznacza zazwyczaj ogromną zmianę, a w istocie dosłownie odnosi się do najmniejszej, której można dokonać.

Bohr nie był pewien, *dłaczego* elektrony orbitują ze ściśle określonymi energiami i przeskakują kwantowo między orbitami, ale

wyjaśnił to, co chciał, upchnął więc razem kilka pomysłów i postanowił się tym nie przejmować.

W istocie Bohr zrobił kolaż z dotąd istniejących idei fizycznych, podobnie jak dziecko, które ukradło różne szmatki z szafy swoich rodziców, pocięło je i posklejało razem, tworząc szczery, ale brzydki obrazek. A ponieważ nikt inny nie zrobił tego lepiej, wszyscy po prostu to zaakceptowali i ponaklejali go sobie na lodówkach.

Fizyka nigdy nie jest nudna

Jednak skok kwantowy tłumaczy jeszcze coś bardzo ważnego. Protony przyciągają swoje elektrony. To przyciąganie elektrony muszą pokonać w efekcie fotoelektrycznym, który omawialiśmy wcześniej. Taką właściwość cząstki nazywamy „ładunkiem” i występuje on w dwóch odmianach, zwanych dodatnim (dla protonów) i ujemnym (dla elektronów). Cząstki o tym samym ładunku odpychają się podobnie jak końcówki magnesu, podczas gdy te mające przeciwne ładunki się przyciągają.

Pojęcie ładunku jest znane od czasów Benjamina Franklina i jego eksperymentu z piorunami (nawiasem mówiąc, to był prawdziwy eksperyment, a nie legenda miejska)¹⁸. Jaki jest naprawdę ładunek, to rzecz skomplikowana (dowiemy się o tym w rozdziale 12), ale niezależnie od tego, czy wiesz, co powoduje pojawienie się ładunku, nasuwa się pytanie: jeśli elektrony mają ładunek przeciwny do protonów i są do nich przyciągane, to dlaczego nie spadają spiralnie w kierunku jądra, zmniejszając atom? Dlaczego atomy nie ulegają zagładzie?

Odpowiedź Bohra brzmiała: ponieważ naruszyłoby to zasadę kwantowania energii. Elektron na najniższej powłoce, najbliższej jądra, znajduje się na dolnym szczeblu drabiny energetycznej. Gdyby zaczął dryfować do wewnątrz, przyjmowałby wszystkie rodzaje wartości, które nie są dozwolone.

Jedynym sposobem utraty energii na najbardziej wewnętrznej powłoce byłoby całkowite wypadnięcie z tej drabiny i koniec istnienia. Elektrony mogą mieć wielką ochotę spaść na jądro, ale

zasada kwantowania energii jest bardziej podstawowa niż prawo przyciągania ładunków.

Królowie elektronów

Mniej więcej w tym czasie gdy teoria kwantowa zaczynała kiełkować w Europie, niekwestionowanym guru fizyki cząstek elementarnych był brytyjski fizyk J.J. Thomson – człowiek, który wykazał, że elektrony mają ładunek ujemny, a przede wszystkim je odkrył.

Dzisiaj prochy Thomsona pochowane są obok szczątków Isaaca Newtona, a wydział fizyki Uniwersytetu Cambridge znajduje się przy alei J.J. Thomsona. Och, a jeszcze otrzymał tytuł szlachecki. Do tego Nagrodę Nobla. Podobnie jak jego sześciu studentów.

Ale czy odkrył kwantowe spodnie?

Thomson okrył się chwałą dzięki odkryciu elektronów i ich własności. Wykazał ich istnienie, odchylając łuk elektryczny i mierząc, ile waży. Skoro elektryczność miała masę, to najwyraźniej składała się z cząstek, które również miały masę.

Kiedy 30 kwietnia 1897 roku ogłosił to odkrycie, na koniec wykładu podeszło do niego kilka osób, aby pogratulować mu udanej mistyfikacji¹⁹. Wszak nic nie może być mniejsze od atomu, czyż nie?

Elektrony są prawdziwe, nie popełnij błędu. Są dwa tysiące razy lżejsze od najmniejszego atomu, czyli wodoru, ale mimo to są prawdziwe. Thomson pierwotnie chciał nazwać je korpuskułami na cześć Newtona, a amerykański fizyk Carl Anderson – negatronami²⁰ (co byłoby, wszyscy możemy się zgodzić, najlepszą nazwą, jaką można sobie wyobrazić), ale mimo to przyjęło się określenie elektron.

Wśród wielu wybitnych studentów Thomsona był Ernest Rutherford, który odkrył jądro atomowe, oraz Niels Bohr, który wykazał, że elektrony muszą orbitować wokół tego jądra w powłokach.

Najbardziej rewolucyjnym odkryciem dokonany przez jednego z uczniów Thomsona było to, że elektrony przez cały czas nie

zachowują się jak cząstki. Czasami zachowują się jak fale, podobnie do fotonów. Odkrycia tego dokonał George Thomson, jego syn.

George interesował się naturą światła, raz korpuskularną, a raz falową, i postanowił sprawdzić, czy tę samą własność mają elektrony.

Jeśli elektrony miałyby właściwości falowe, to oczywiście musiałyby to być bardzo małe fale, skoro tak długo pozostawały niewykryte. Aby dokonać dyfrakcji elektronów na podwójnej szczelinie, potrzebowałby maleńkiej podwójnej szczeliny (mniejsze fale wymagają mniejszej separacji pomiędzy szczelinami), co nie było łatwe do osiągnięcia.

Aby poradzić sobie z tym problemem, stworzył film celuloidowy, taki jak używany w kamerach filmowych, ponieważ w celuloidzie atomy są rozmieszczone rzędami w regularnych odstępach, przypominających podwójne szczeliny w skali atomowej. Następnie przepuścił przez niego wiązkę elektronów.

Z pewnością wiązka po drugiej stronie utworzyła wzór pasków jak u zebry, co oznaczało, że elektrony musiały wzajemnie interferować tak jak fale. (Uwaga: elektrony to w istocie cząstki Tonomury, których użył on w eksperymencie z lat wcześniejszych, ale czułem, że gdybym wyjawiał w tym punkcie rozdziału, że elektrony są falami, wywołałoby to masową panikę, zamieszki i koniec cywilizacji, jaką znamy. Dlatego kłamałem).

Okazuje się, że elektrony, o których wszyscy wiedzieli, że są cząstkami, mogą podlegać superpozycji i dyfrakcji jak fale światła. Nagroda Nobla dla George'a.

To całkiem zabawna sytuacja, że J.J. Thomson w 1908 roku zdobył Nagrodę Nobla za udowodnienie, że elektrony są cząstkami, a następnie jego syn otrzymał ją w 1937 roku za udowodnienie, że nie są. Lubię sobie wyobrażać krępujące kolacje bożonarodzeniowe w domu Thomsonów z J.J. i George'em siedzącymi naprzeciwko siebie, mającymi na głowach papierowe kapelusze, od niechcienia polerującymi swoje medale, podczas gdy zakłopotana pani Thomson, wierząc się między nimi, pyta: „Kochani, czy któryś z was ma ochotę na pudding śliwkowy?”.

- [13](#) F. Swain, *The Universe Next Door*, John Murray, Londyn 2017.
- [14](#) G. Lewis, *The Conservation of Photons*, „Nature” 1926, t. 118, nr 2981, s. 874–875.
- [15](#) Ang. *jiffy* (przyp. red.).
- [16](#) A. Howie, *Akira Tonomura (1941–2012)*, „Nature” 2012, t. 486, nr 7403, s. 324.
- [17](#) N. Blaedal, *Harmony and Unity: The Life of Niels Bohr*, Plunkett Lake Press, Lexington 2017.
- [18](#) B. Franklin, *Experiments and Observations on Electricity*, „Pennsylvania Gazette”, 19 października 1752 r.
- [19](#) J.J. Thomson, *Recollections and Reflections*, G. Bell and Sons, Londyn 1936.
- [20](#) I. Asimov, *Words of Science*, Harrap, Londyn 1974.

Rozdział 3

Arystokraci, bomby i pyłki

Księżę dualizmu

Pamiętam, jak wiele lat temu, w dniach mojej burzliwej młodości, byłem na rozmowie kwalifikacyjnej na uniwersytecie. Siedziałem przed czterema wybitnymi naukowcami, którzy pytali mnie, co wiem o teorii kwantowej. Wygłupiłem się, wspominając o tym w moim podaniu, chcieli mnie więc upiec na ruszcie i spuścić w dół o jakieś dwie powłoki energetyczne.

Wyrecytowałem kilka faktów o falach i cząstkach, próbując sprawić, by wyglądało to tak, jakbym znał się na rzeczy. Tymczasem jedna z tych osób podniosła rękę, by zatrzymać moje wodolejstwo, i zapytała bardzo łagodnie: „Zatem elektron to cząstka czy fala?“, a potem usiadła z powrotem, by patrzeć, jak się plączę. Wcale nie jestem rozgoryczony tym doświadczeniem, ale szczerze mówiąc, zadano mi pytanie, na które nie ma odpowiedzi.

Zagadka elektronów i fotonów zachowujących się w tak różny sposób nazywana jest „dualizmem falowo-korpuskularnym” – termin ten został ukuty przez francuskiego arystokratę Louisa Pierre’a Raymonta, siódmego księcia de Broglie (w skrócie Louisa de Broglie’a). Louis służył w wojsku podczas I wojny światowej i starał się zdobyć potem wykształcenie zarówno w dziedzinie historii, jak i fizyki, co według niego umożliwiłoby mu zrozumienie, jaka była przeszłość i jaka będzie przyszłość ludzkości.

Kiedy miał dwadzieścia lat, teoria kwantowa stała się wielkim wyzwaniem w nauce, postanowił więc napisać swoją pracę doktorską na temat tej wielkiej zagadki. Czy to możliwe, aby obiekty we Wszechświecie nie były ani cząsteczkami, ani falami i przybierały tylko te formy w zależności od tego, jaki eksperyment jest przeprowadzany? Czy elektrony i fotony w jakiś sposób przeskakiwały tam i z powrotem pomiędzy tymi dwoma stanami? Czy nasze słabe, podobne do szympanskich mózgi mogą poradzić sobie z tym, co natura naprawdę wyprawia na poziomie kwantowym?

Kiedy myślimy o falach, możemy obliczyć, ile energii przenoszą, na podstawie ich częstości (ile szczytów fal uderza w ciebie w ciągu sekundy) i długości (jak daleko od siebie znajdują się kolejne szczyty fali).

Ponieważ możemy również obliczyć energię poruszającej się cząsteczki, znając jej masę i prędkość, de Broglie zapytał: dlaczego nie zrównać tych dwóch energii, jeśli znamy własności czegoś, co wyobrażamy sobie jako cząstkę, której energię da się obliczyć, a następnie przełączyć nasz mózg na wyobrażenie sobie tego czegoś jako fali, której energię właśnie obliczyliśmy. Energia jest translatorem między fizyką fal a fizyką cząstek elementarnych.

Początkowo do sugestii tej podchodzono ze sceptycyzmem. Czy naprawdę każda cząstka ma długość fali, a każda fala masę? Na szczęście dla de Broglie'a Albertowi Einsteinowi bardzo spodobał się jego pomysł i zaczął wyrażać dlań aprobatę podczas swych wykładów (co nigdy nie boli).

W swym podejściu de Broglie mówi, że można wziąć dowolną cząstkę i obliczyć „powiązaną z nią długość fali”. Kiedy już to zrobisz, możesz zbudować podwójną szczelinę o odpowiednim rozmiarze i wystrzelić w nią swoją cząstkę, uzyskując wzór interferencyjny po drugiej stronie. Chociaż być może nie potrafimy sobie wyobrazić, jak coś może być jednocześnie cząstką i falą, to na pewno możemy zrobić obliczenia i uzyskać wiarygodne dane.

I to działa. W 1944 roku Ernest Wollan wykorzystał teorię de Broglie'a do dyfrakcji na kryształach soli kuchennej²¹ neutronów, tysiąc razy cięższych od elektronów. Protony mogą ulegać dyfrakcji w ten sam sposób, chociaż, co zaskakujące, nie ma żadnych wzmianek

o tym, kto pierwszy przeprowadził taki eksperyment. Patrząc z perspektywy czasu, w tym podaniu na uniwersytet nie powinienem być twierdzić, że to byłem ja.

Odrobina skrajności

Uświadomienie sobie, że protony, neutrony i elektrony zachowują się jak fale, jest przeżyciem głębokim i osobliwym. We Wszechświecie każdy obiekt jest zbudowany z tych cząstek, zatem materia, w tym nasze własne ciała, ma również własności falowe. Twoje ciało ma długość fali i jeśli w jakiś sposób wystrzela cię na odpowiednią podwójną szczelinę, to możesz ulec dyfrakcji.

Jeśli cię to ciekawi, to dodam, że przeciętny człowiek wystrzelony z armaty z prędkością 30 metrów na sekundę miałby długość fali de Broglie'a około 0,00000000000000000000000003 metra. Gdybyśmy znaleźli jakiś sposób na to, aby każdy atom w ludzkim ciele trafił na podwójną szczelinę tej wielkości, to rzeczywiście moglibyśmy uzyskać dyfrakcję. Myślę, że możesz wykorzystać tego swojego ochotnika z wcześniejszego eksperymentu, w którym trzeba było mu odstrzelić rękę kulą armatnią.

Obecny rekord świata w dyfrakcji obiektów większych niż pojedyncza cząstka należy do Sandry Eibenberger, która w 2013 roku zdołała dokonać dyfrakcji całej molekuły $C_{284}H_{190}F_{320}S_{12}N_4$. Stanowi ją 810 atomów przechodzących przez obie szczeliny jednocześnie i doznających superpozycji ze sobą po drugiej stronie²². To niezupełnie cała osoba, ale trzeba od czegoś zacząć.

Wkracza Heisenberg

Zanim stał się grany przez Bryana Cranstona²³ niepraworządnym wykładowcą chemii w Nowym Meksyku, Werner Heisenberg był jednym z najlepszych matematyków na świecie. W przeciwieństwie do Plancka, Einsteina i de Broglie'a, którzy opierali się na wynikach eksperymentów, Heisenberga bardziej interesowały dobrze ugruntowane teorie, które badał na granicach ich stosowalności, nie

zważając na wiążące się z tym utrudnienia dla eksperymentatorów, którzy chcieliby potwierdzić te wyniki.

Był notorycznie niezaznajomiony z fizyką realnego świata, podczas egzaminu doktorskiego bowiem został zapytany, jak działa zwykła bateria, i nie miał o tym najmniejszego pojęcia²⁴ (co dodaje mi otuchy, gdyż najwyraźniej Heisenberg też natrafił na egzaminatorów lubujących się w upokarzaniu egzaminowanego).

Pomimo tej niekompetencji dotyczącej zagadnień praktycznych jego matematyczny blask był tak niezrównany, że w 1920 roku został zatrudniony przez Arnolda Sommerfelda, jednego z fizyków, którzy pomogli Bohrowi opracować jego teorię atomu.

Sommerfeld dał mu do rozwiązania łamigłówkę, która polegała na matematycznym opisie pewnych dziwnych aspektów rozszczepienia światła, a Heisenberg złamał ją w ciągu dwóch tygodni. Jednak jego rozwiązanie było tak skomplikowane, że Sommerfeld odrzucił je, zakładając, że nie mógł on tak szybko znaleźć poprawnej odpowiedzi. Kilka miesięcy później bardziej znany fizyk Alfred Landé opublikował ten sam pomysł, zyskując uznanie²⁵.

Wkrótce po tym doświadczeniu Heisenberg przeniósł się do Nielsa Bohra pracującego w kopenhaskim instytucie fizyki w Danii, do światowego bastionu badań kwantowych. Być może czuł się rozgoryczony sposobem, w jaki Sommerfeld nie zaakceptował jego geniuszu, a może po prostu miał ochotę pracować dla noblisty (Sommerfeld był nominowany 84 razy, ale nigdy nie został laureatem). Tak czy inaczej, Heisenberg przeprowadził się i stał się jednym z najważniejszych uczniów Bohra oraz jednym z najbliższych przyjaciół.

Były to złote lata dla Heisenberga. Znalazł się w otoczeniu najbystrzejszych umysłów Europy, tworzących wiele metod i równań, które do dziś stosowane są w fizyce kwantowej. Razem z Bohrem chodzili razem po górach, wyruszali na miasto w poszukiwaniu przygód i spędzali każdą chwilę na zastanawianiu się nad dziwnym zachowaniem cząstek. W owym czasie Heisenberg czuł się naprawdę szanowany i szczęśliwy

Niestety, druga połowa jego życia była już kontrowersyjna. W czasie rozprzestrzeniania się nazizmu w Niemczech, a potem

w Europie, wielu naukowców uciekało przed prześladowaniami, przenosząc się do Ameryki. Heisenberg pozostał jednak w Niemczech i brał udział w budowie bomby atomowej dla nazistów.

Niektórzy historycy twierdzą, że Heisenberg próbował sabotować te wysiłki, ponieważ w powojennych wywiadach dla prasy dokładnie opisał, jak można zbudować taką bombę, mimo że jego projekt nigdy się nie powiódł. Być może zorientował się w tym wszystkim, ale zatrzymał wiedzę dla siebie, by powstrzymać nazistowskie wysiłki²⁶.

Jednakże w 2002 roku ujawniono korespondencję między Heisenbergiem i Bohrem, a ona przedstawia znacznie mroczniejszy obraz. Wygląda na to, że Heisenberg bez wyrzutów sumienia pracował nad bombą i zawiódł tylko dlatego, że brakowało mu dobrego zespołu eksperymentatorów (dobrzy naukowcy byli już w Stanach), a sam nie miał pojęcia o pracy w laboratorium²⁷. Chyba cały sprzęt był zasilany bateriami.

Nikt nie wie na pewno, jaka w tym czasie była postawa etyczna Heisenberga. Miał kłopoty związane z promowaniem osiągnięć naukowych Alberta Einsteina, fizyka pochodzenia żydowskiego, i uniknął poważniejszych problemów tylko dlatego, że uchroniła go od nich matka. Pani Heisenberg była dobrą znajomą pani Himmler, matki Heinricha Himmlera, szefa SS, a kiedy Heisenberg miał kłopoty, zadzwoniła do swojej przyjaciółki i poprosiła: „Powiedz swojemu synowi, żeby zostawił mojego w spokoju!”²⁸.

Jeśli chodzi o postępowanie Heisenberga, to podejrzewam, że po prostu nie zastanawiał się nad etycznymi konsekwencjami tego, co robił. Chciał tylko rozwiązać problem fizyczny, który został mu postawiony.

Osądzanie go z perspektywy czasu w kategoriach dobra lub zła jest trudne, ponieważ niewiele o tym wiemy i nie zapominajmy, że strona sprzymierzonych nie składała się wyłącznie ze świętych. Robert Oppenheimer, zajmujący podobne stanowisko w Ameryce co Heisenberg w Niemczech, był człowiekiem, który kiedyś próbował otruć swojego promotora w prawdziwie bajkowym stylu, pokrywając jabłko toksycznymi substancjami – a to moglibyśmy zakwalifikować jako usiłowanie zabójstwa²⁹.

Jeśli jednak pominąć polityczny wydźwięk jego późniejszej działalności, wkład Heisenberga w teorię kwantów jest wciąż uważany za bezcenny.

Skup się na jednym

Pewnego lata podczas nasilenia się objawów kataru siennego Heisenberg postanowił spędzić wakacje na wyspie Helgoland, na której nie rosną rośliny pyłące. Podczas tej przerwy wymyślił nową metodę matematyczną w teorii kwantów; jej istotnym elementem była koncepcja, z której jest do dziś najbardziej znany – zasada nieokreśloności Heisenberga³⁰.

Cząstki mają jasno określone mierzalne własności, takie jak położenie, prędkość, masa i tak dalej. Jeśli wiemy wszystko o początkowym stanie cząstki, to teoretycznie możemy przewidzieć wszystko, co stanie się w chwili następnej. Potem w następnej. I następnej.

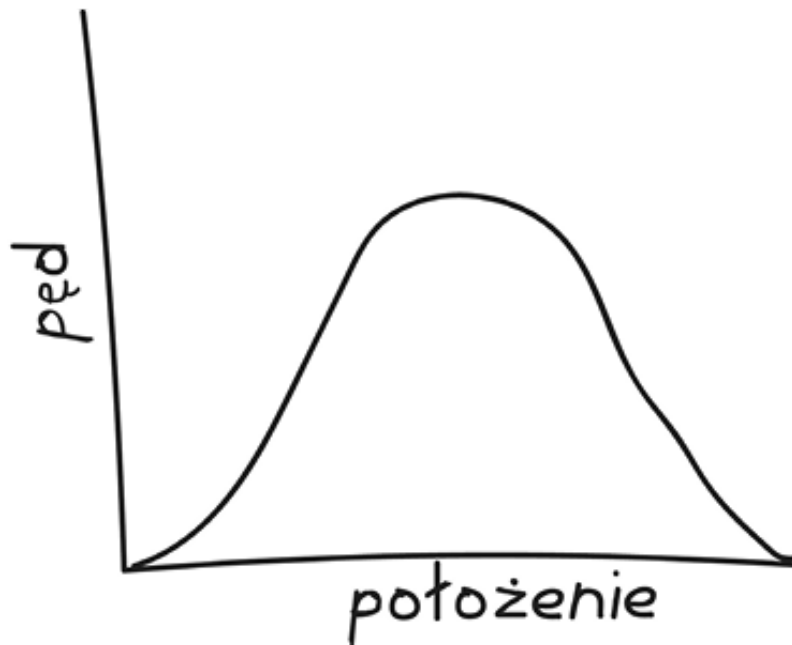
Filozofia determinizmu ma swój początek w pracach Isaaca Newtona i to właśnie ona czyni fizykę tak ważną. Podczas gdy dawni mistycy zabijali dziewice i pili krew gołębicy, by przewidzieć przyszłość, Newton pokazał, że można to zrobić kilkoma równaniami ze stuprocentową dokładnością.

Natomiast de Broglie i jego koledzy odkryli, że wszystkie cząstki mają również własności falowe. Zapytania, „gdzie” jest cząstka i „jak szybko” się porusza, są rozdzielnymi pytaniami w fizyce Newtona, ale ponieważ fale z definicji stale się przemieszczają, a ich położenie jest rozłożone na cały obszar występowania, koncepcje takie jak prędkość i położenie nie są już od siebie niezależne.

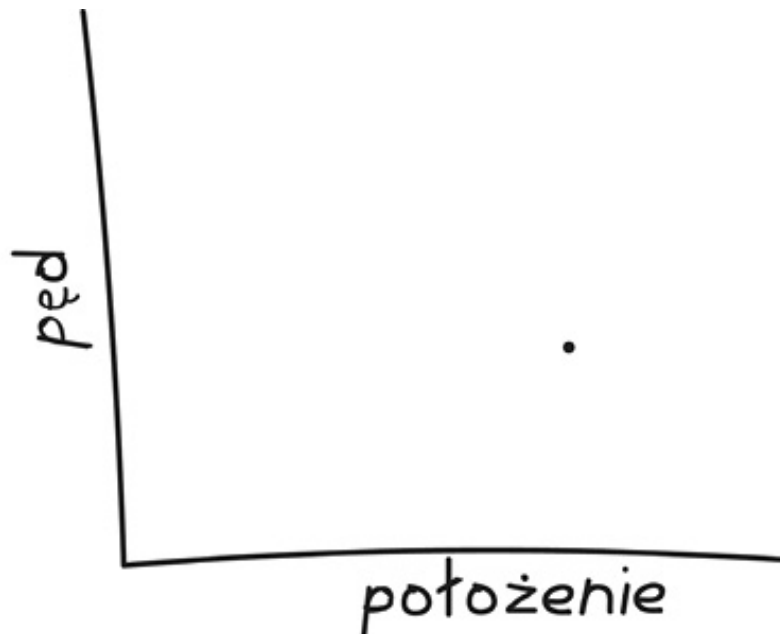
Jeśli wiesz coś o położeniu fali, to masz również informacje o jej prędkości i na odwrót – te dwie własności są ze sobą związane. Heisenberg zastosował więc podobny pomysł do cząstek. Ich ruch i położenie nie mogą być tak naprawdę traktowane oddzielnie, ponieważ tylko częściowo mają charakter korpuskularny.

Jeśli mamy cząstkę i nie dokonaliśmy jeszcze na niej żadnych pomiarów, możemy określić jej pęd i położenie za pomocą takiego

wykresu jak ten:

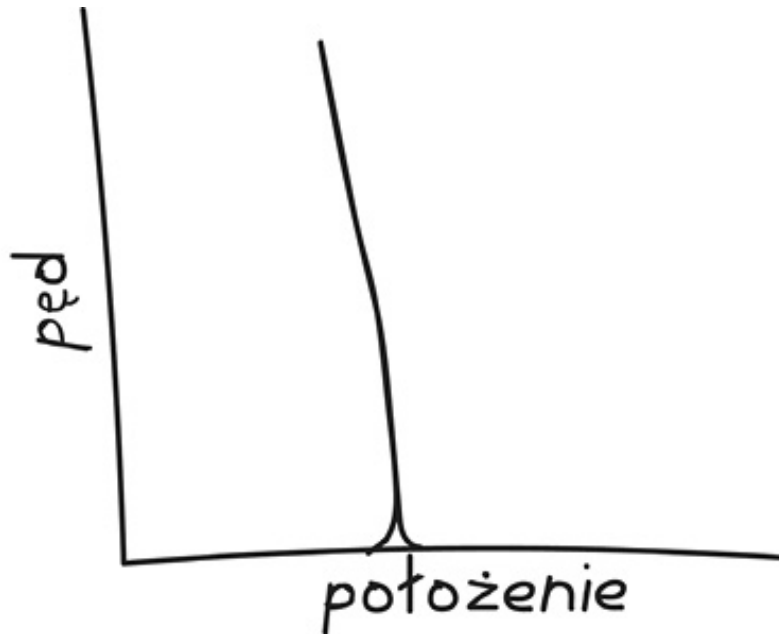


Wiemy tylko, że właściwości fizyczne cząstki znajdują się gdzieś wewnątrz tego garbu. Normalnie, klasycznie rzecz biorąc, kiedy dokonujemy pomiaru na cząstce, gdzieś na siatce wykresu zgniatamy ten garb w kropkę, która znajdzie się na przecięciu obu wartości i powie nam, gdzie jest cząstka i jaki ma pęd.



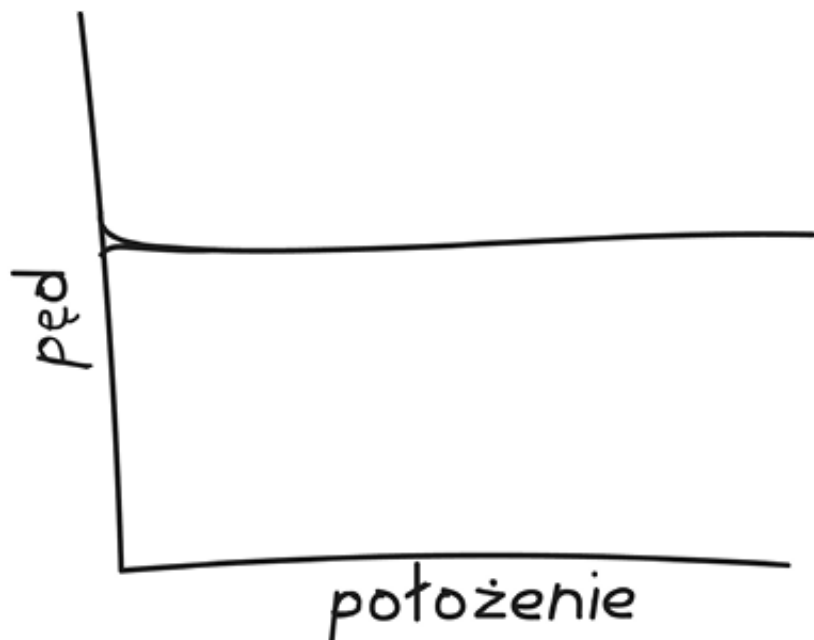
Na tym wykresie wzdłuż osi poziomej odłożone jest położenie cząstki, a wzdłuż osi pionowej jej pęd. To proste.

Heisenberg jednak wiedział, że fale są inne. Gdy próbujesz określić położenie fali, otrzymujesz taki skok jak ten ukazany poniżej:



Wiemy dokładnie, gdzie znajduje się cząstka, ponieważ zawęziliśmy jej położenie do jednej wartości na osi poziomej, ale pionowo odczytujemy cały szereg różnych pędów w tym samym położeniu, ponieważ położenie i pęd fali nie są rozdzielone, tak jak by to było w klasycznej fizyce dnia codziennego. Jeśli znamy położenie cząstki, tracimy wszelką pewność co do jej pędu.

Z kolei jeśli jesteśmy zdolni do precyzyjnego pomiaru wartości pędu cząstki, to kończymy z cząstką istniejącą w wielu położeniach naraz:



Pęd i położenie są w teorii kwantów własnościami związanymi, możemy więc wiedzieć albo gdzie znajduje się cząstka, albo jaki jest jej pęd, ale nigdy nie zdołamy poznać obu tych własności jednocześnie.

Czy jesteśmy całkiem tego pewni?

Była to pierwsza „zasada nieokreśloności” i najczęściej cytowana: położenia i pędu cząstki nigdy nie można określić w tym samym czasie, a jeśli chcesz znać jedno z nich, tracisz wszelką wiedzę o drugim. W miarę ewolucji teorii kwantów odkryliśmy inne pary własności, które są związane ze sobą (o tym trochę później), ale oryginalna zasada Heisenberga wciąż wstrząsała podstawami fizyki.

Mówiąc wprost, zgodnie z teorią kwantów nie można wiedzieć wszystkiego o obiekcie, ponieważ zawsze będzie coś, czego nie będziemy w stanie zmierzyć. Jeśli wiesz wystarczająco dużo o jednej własności, automatycznie tracisz informacje o czymś innym.

W ten sposób przez matematycznego kujona z katarem siennym zniszczony został newtonowski pogląd na Wszechświat, w którym poznajemy przyszłość na podstawie wiedzy o teraźniejszości. Nie

możemy już wiedzieć wszystkiego o teraźniejszości, nigdy więc nie da się poprawnie przewidzieć przyszłości. Nigdy.

Czasami zasada nieokreśloności Heisenberga jest mylnie interpretowana jako twierdzenie, że nasze przyrządy nie są wystarczająco dokładne, aby poznać wszystkie własności cząstki. To raczej świadczyłoby o niskiej samoocenie. Nie ma znaczenia, jak dobrze zbudujemy detektor, i nie ma znaczenia, jak dokładnie dokonamy pomiaru. Nigdy nie jesteśmy w stanie dokładnie określić własności cząstki, ponieważ nie jest ona wyłącznie cząstką. Jest też falą.

Pytanie o własności elektronu jako cząstki jest pytaniem typu: „Jaką literą jest *Wojna i pokój*?” lub „Jakiego koloru jest tęcza?”. To próba uściślenia czegoś, czego nie można uściślić.

Sam Heisenberg ujął to tak: „Z zasady nie możemy znać teraźniejszości we wszystkich jej szczegółach”³¹. Teoria kwantów zmusza nas do rezygnacji z marzenia Newtona o dokładnym przewidywaniu przyszłości.

W codziennym świecie łatwo się dowiedzieć, gdzie jest dany obiekt i jak szybko się przemieszcza. W rzeczywistości stanowi to podstawę każdego sportu. Gra w koszykówkę kwantową byłaby całkowicie niewykonalna (choć zabawna), gdybyśmy bowiem rzucali piłkę ze znanym pędem, nie moglibyśmy już być pewni, gdzie ona jest. Rozmywałaby się do postaci chmury o kształcie piłki i chociaż moglibyśmy obserwować, jak szybko ta chmura się porusza, nie potrafilibyśmy dokładnie określić, gdzie musielibyśmy stanąć, aby ją złapać. Jedynym powodem, dla którego nie dostrzegamy zasady nieokreśloności w naszym życiu codziennym, jest to, że jesteśmy bardzo duzi w porównaniu z wielkością „chmur nieokreśloności”. Nie powoduje to problemów, gdy wykonujemy codzienne zadania, ale jeśli chcemy mierzyć pojedynczą cząstkę, natykamy się na ścianę niewiedzy.

Oznacza to również, że cząstki nigdy nie da się przywrócić do stanu spoczynku. Gdyby elektron przestał się poruszać wokół jądra, miałby jasno określone położenie i określony pęd (zero). Zachowywałby się tylko jak cząstka i zanikłby jego falowy charakter. Tak się jednak nie dzieje i dlatego cząstki muszą nieustannie się poruszać.

Według własnych słów Heisenberga:

Była już prawie trzecia nad ranem, gdy otrzymałem ostateczny wynik moich obliczeń [...] Na początku byłem głęboko zaniepokojony. Miałem wrażenie, że przez powierzchnię zjawisk atomowych patrzę na dziwnie piękne wnętrze. Poczułem zawrót głowy na myśl, że teraz muszę zbadać to bogactwo matematycznych struktur, które natura tak hojnie rozpostarła przede mną. Byłem zbyt podekscytowany, by spać, zatem z nastaniem nowego dnia dotarłem na południowy kraniec wyspy, gdzie marzyła mi się wspinaczka na skały wychodzące w morze. Zrobiłem to bez większych problemów i czekałem na wschód słońca²¹.

²¹ E. Wollan, L. Borst, *Physics Section III Monthly Report for the Period Ending December 31, 1944*, „Oak Ridge, Tennessee Clinton Laboratories, Metallurgical Report” 1945, nr M-CP-2222.

²² S. Eibenberger i inni, *Matter-wave Interference with Particles Selected from a Molecular Library Masses Exceeding 10,000 amu*, „Physical Chemistry Chemical Physics” 2013, t. 15, s. 14696–14700.

²³ Taki przydomek – Heisenberg – ma główny bohater serialu *Breaking Bad* grany przez Bryana Cranstona (przyp. tłum.).

²⁴ D. Cassidy, *The Sad Story of Heisenberg’s Doctoral Oral Exam*, „APS News” 1998, t. 7, nr 1.

²⁵ J. Gribbin, *W poszukiwaniu kota Schrödingera: realizm w fizyce kwantowej*, przeł. J. Bieroń, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań 1997.

²⁶ D. Charles, *Heisenberg’s Principles Kept Bomb From Nazis*, „New Scientist” 1992, nr 1837.

²⁷ J. Glanz, *Letter May Solve Nazi A-Bomb Mystery*, „New York Times”, 7 stycznia 2002 r.

²⁸ G. Blazeski, *The Nazis were harassing Heisenberg so his mother called Himmlers mom asked her if she would please tell the ss to give her son a break*, „Vintage News”, 8 kwietnia 2017 r., dostępne na: <https://www.thevintagenews.com/2017/04/08/the-nazis-wereharassing-heisenberg-so-his-mother-called-himmlers-mom-askedher-if-she-would-please-tell-the-ss-to-give-her-son-a-break/> (dostęp 15 grudnia 2018 r.).

- [29](#) M. Gladwell, *No Mercy*, „New Yorker”, 4 września 2006 r.
- [30](#) A. Trabesinger, *The Path to Agreement*, „Nature Physics” 2008, t. 4, nr 349.
- [31](#) D. Kevles, *The Physicists: The History of a Scientific Community in Modern America*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1995.
- [32](#) W. Heisenberg, *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*, G. Allen & Unwin, Londyn 1971.

Rozdział 4

Oswajanie bestii

Och, doktorze Schrödinger!

Teoria atomu Bohra z jego powłokami elektronowymi i skokami kwantowymi nadal nie wszystkim była w smak. Nie tłumaczyła, dlaczego tylko pewne powłoki energetyczne są dozwolone. A dane, które przewidywała, nie zawsze zgadzały się z eksperymentem.

Bohr upichcił swój atom z różnych teorii, jak dziecko bawiące się lalkami i zmuszające je do pocałunku. Wiedział, że to nie będzie stałe rozwiązanie. Musiała istnieć schludniejsza, bardziej elegancka teoria, której nikt jeszcze nie znał. Wymyślił ją Erwin Schrödinger, człowiek, którego życie osobiste było w mieście ważniejszym tematem rozmów niż jego teorie.

Schrödinger w wymiarze społecznym był ekscentrykiem, z przekonania liberałem, geniuszem noszącym muszki, płodnym pisarzem poruszającym w ciągu pięćdziesięciu lat kariery wiele tematów, między innymi z dziedziny nauki, sztuki i filozofii. Był wyrzutkiem z kulturalnych sfer za wywołanie skandalu życiem w trójkącie z żoną i kochankami, Anny i Hilde, a także za spłodzenie dzieci z co najmniej dwoma innymi kobietami (wbrew popularnemu mitowi uczeni mogą wieść bardzo aktywne życie osobiste i wcale nie mieć kłopotów ze znalezieniem osób gotowych na godzenie się na ich styl życia)³³.

Jakkolwiek interesujące, to jednak nie figle-migle w życiu osobistym Schrödingera były powodem, dla którego otrzymał

Nagrodę Nobla (byłaby to całkiem niezła laudacja). Przyznano mu ją za stworzenie nadrzędnego przepisu wyjaśniającego budowę atomu.

Humbug

Schrödinger nienawidził świąt Bożego Narodzenia. Był przeciwny imprezom o zabarwieniu religijnym i dlatego w grudniu 1925 roku postanowił odizolować się w położonej na uboczu willi w Szwajcarii. Jego żona została w domu, ale w trakcie tej hibernacji towarzyszyła mu „stara przyjaciółka z Wiednia”, której tożsamość jest nadal nieznana³⁴. Choć w tym czasie zaprzestał zapisków w dzienniku – nikt więc naprawdę nie ma pojęcia, do czego doszedł – wiemy, że na wakacje zabierał ze sobą problemy fizyczne do rozwiązania.

Uczony ten początkowo nie interesował się teorią kwantów. Był utalentowanym fizykiem, ale jego specjalnością było zachowanie się fal, a nie cząstek. Elektrony, fotony i protony szczerze go nudziły. Tak było oczywiście do czasu, gdy badacze zdali sobie sprawę z tego, że te cząstki musimy też traktować jak fale.

Schrödinger wiedział, że istnieją dziesiątki równań przewidujących zachowanie elektronów jako cząstek, ale nikt nie wymyślił metody opisanie ich w postaci fal. Później tak pisał o tym czasie (parafraza z języka niemieckiego): „ta skrajna koncepcja może być błędna [...] z drugiej strony przeciwny punkt widzenia, który nie docenia fal, doprowadził do takich trudności, że pożądane wydaje się położenie olbrzymiego nacisku na przeciwne podejście”³⁵.

Wszyscy inni stosowali fizykę cząstek do opisu atomów, ale gdyby udało mu się wymyślić równanie falowe, aby zrobić to samo, być może stałoby się to nowym spojrzeniem. Zasadniczo Schrödinger w niezręczny sposób próbował być inny. Jednak biorąc pod uwagę jego sukces z płcią przeciwną i Nagrodę Nobla umieszczoną na kominku, może jednak miał rację.

Uczony sam przyznał, że nie miał wystarczającej wiedzy matematycznej, aby wymyślić nowe prawo³⁶, ale tej tajemniczej zimy zaskoczył sam siebie, gdy bowiem nadszedł nowy rok, osiągnął już

właśnie to, czego wszyscy poszukiwali: równanie, które dokładnie przewiduje energie elektronów krążących wokół jądra.

Schrödinger odłożył na bok pytanie, jak działa dualizm korpuskularno-falowy, i skupił się tylko na własnościach falowych. Wyobrażał sobie rozciąganie elektronu po powierzchni atomu jak kawałek masła rozsmarowywany na kromce chleba, a powstała w ten sposób elektronowa membrana mogłaby się owinać wokół jądra i drgać z określonymi częstotliwościami.

Jeśli znamy kilka danych wejściowych, takich jak masa lub przyciąganie jądra, to równanie Schrödingera, dzięki czemuś, co jego twórca nazwał funkcją falową, precyzyjnie przewiduje kształt i drgania trójwymiarowej chmury elektronowej atomu.

Funkcja falowa wynika z równania i tworzy listę własności, jakie ma elektron w danym punkcie przestrzeni albo momencie: amplitudę jego fali, długość fali, prędkość fali i tak dalej.

Równanie Schrödingera jest matematycznym działaniem na takiej funkcji falowej i przewiduje, jak własności i zachowanie elektronu ewoluują w czasie. I nie tylko to, w końcu bowiem wyjaśnia, dlaczego dopuszczalne są jedynie pewne wartości energii w powłokach elektronowych.

Tam, dokąd podążamy, nie potrzebujemy cząstek

Ponieważ każdy elektron w atomie jest więziony przez jądro, istnieją ograniczenia w jego zachowaniu. Na przykład fala może mieć tylko całkowitą liczbę grzbietów, tak jak pokazano na dwóch poniższych obrazkach. Lewy obrazek prezentuje pojedynczy grzbiet, a prawy podwójny.



Nie możesz mieć trzech czwartych grzbietu, na odcinku bowiem ma być ich całkowita liczba. Tylko określone kształty są dozwolone.

Owe dozwolone fale są nazywane „harmonikami” i ta nazwa, która brzmi nieco muzycznie, nie jest przypadkowa. Kształty na powyższych wykresach odpowiadają nutom, które można grać na instrumencie strunowym, z tym że każdy kształt fali wytwarza inny dźwięk w powietrzu.

Kiedy szarpiesz strunę gitary lub bandzo, to drga ona ze ściśle określoną energią. Inna nuta to inna harmonika (dozwolona fala), a równanie Schrödingera wskazuje, że elektrony związane z jądrem są równie muzykalne.

Musimy oczywiście przejść do wyższych wymiarów, ponieważ atomy nie są liniami prostymi, ale jeśli da się obliczyć harmoniki drgań trójwymiarowych, to powinniśmy uzyskać kształty, jakie mogą przyjmować fale elektronowe. Raczej trudno sobie wyobrazić, jak można to faktycznie obliczyć (na to już talent matematyczny Schrödingera nie wystarczył), ale na szczęście inni matematycy szybko się z tym uporali.

Pierwsza elektronowa harmonika jest sferyczna (pokazana poniżej po lewej stronie). Druga harmonika wygląda jak dwa zgniecione razem balony, jeden z przodu, drugi z tyłu (pokazane po prawej):



Te przypominające hantle i kuliste kształty mówią nam, jaki jest kształt fali elektronowej. Zamiast traktować elektrony jak maleńkie kuleczki okrążające jądro, musimy je sobie wyobrażać jako drgające

powierzchnie przybierające takie cebulaste kształty z jądrem w centrum. A gdy posuwamy się w górę energii, kształty stają się bardziej skomplikowane (zbyt trudne dla mnie do narysowania... już osiągnąłem swoje artystyczne granice tymi kulistymi szkicami, ale jeśli jesteście ciekawi, to wygooglujcie sobie termin orbital p, d, f).

Te rejony wokół jądra, w których drgają elektrony, nie są już uważane za orbity, nazywamy je więc „orbitalami”. Schrödingale brzmiałoby oczywiście lepiej.

To w końcu wyjaśnia, skąd się bierze kwantyzacja energii. Tylko niektóre harmoniki fali elektronowej zmieszczą się wokół jądra, zatem dla danego atomu możliwe są jedynie pewne wartości energii. W teorii powłok Bohra poziomy energii były czymś, co pojawiało się tylko po to, żeby teoria zgodziła się z eksperymentem. W bardziej zaawansowanej teorii funkcji falowej Schrödingera otrzymujesz poziomy energii jako rozwiązanie równania.

Co jeszcze lepsze, równanie Schrödingera mówi nam, że orbitale różnych atomów tworzą wiązania tylko pod pewnymi kątami, co chemia potwierdza w całości.

Równanie Schrödingera pozbywa się także tych uprzykrzonych skoków kwantowych. To, co się dzieje, gdy elektron przemieszcza się z orbitala wewnętrznego na zewnętrzny, jest jak fala na skakance, która zmienia swą długość w miarę zmiany prędkości ruchu ręki. Przejście wygląda brzydko, ale jest to raczej proces płynny niż natychmiastowy. Wynikiem przejścia fali elektronowej do nowego kształtu jest emisja lub absorpcja fotonu podczas przemieszczania się elektronu z jednego orbitala na drugi.

Jedyny kruczek

Za pomocą równania Schrödingera wykonuje się obliczenia na funkcji falowej, co umożliwia przewidywanie jej zmian. Sama funkcja falowa w pełni opisuje wówczas to, co chcemy wiedzieć o naszym elektronie, i stanowi to bez wątpienia triumf matematyki (pod warunkiem że nie będziemy dociekać fizycznego znaczenia tych operacji). Jedyne, co trzeba zrobić, to wstawić odpowiednie liczby,

pokręcić korbą, a wyplute na kartkę papieru symbole przedstawia wiarygodne dane, informujące o tym, co dzieje się z elektronem w zadanych warunkach. Ale czym... w istocie... jest fala elektronowa?

Jeszcze bardziej niepokojące jest to, że równanie Schrödingera nie dawało prawidłowych odpowiedzi, o ile w wyrażeniu nie znalazło się coś, co nazywa się „liczbą urojoną”. Wiem, że w tej książce stosujemy niematematyczne podejście do fizyki kwantowej, ale liczby urojone są ważne w tej historii i nie możemy ich tak łatwo pominąć. Zapnijcie więc pasy, kochani, zaraz zanurzymy się w matematyce!

Użyj swej wyobraźni

Sprawa jest taka, że jeśli weźmiesz liczbę ujemną, na przykład minus dwa, i podwoisz ją, to otrzymasz w wyniku minus cztery. To obliczenie możemy zapisać jako: $-2 \times 2 = -4$.

Jeśli jednak pomnożymy minus dwa przez minus dwa, to otrzymamy wynik odwrotny. Liczba ujemna pomnożona przez inną liczbę ujemną okazuje się dodatnia, ponieważ stosujemy minus do minusa, to znaczy odwracamy liczbę ujemną. Dwa minusy pomnożone przez siebie dają wynik dodatni, który zapisujemy jako: $-2 \times -2 = 4$.

Wszyscy wiedzą, że pierwiastek kwadratowy z czterech to dwa (jeśli nie... uwaga, spoiler!), ale nie jest to pełne rozwiązanie. Pierwiastek kwadratowy z czterech to właściwie dwa i minus dwa, ponieważ obie liczby podniesione do kwadratu dają cztery.

Oznacza to, że pierwiastek kwadratowy z minus cztery to nie jest minus dwa, ponieważ minus dwa do kwadratu nie daje w wyniku minus cztery. Gdzie więc są pierwiastki kwadratowe z liczb ujemnych? Wydaje się, że nie ma żadnej liczby, którą można pomnożyć przez siebie i w wyniku otrzymać liczbę ujemną.

Aby rozwiązać ten paradoks, grecki matematyk Heron z Aleksandrii wynalazł nowy typ liczby, nienależącej do prostej liczbowej, na której wyobrażamy sobie liczby rzeczywiste, tylko na osi prostopadłej do niej. Są to liczby zdefiniowane jako pierwiastki kwadratowe liczb

ujemnych, a Kartezjusz nazwał je „urojonymi”, ponieważ nie stanowią części zbioru liczb rzeczywistych³⁷.

Przedstawiamy je za pomocą litery i , zdefiniowanej jako pierwiastek kwadratowy z -1 . Liczba i^2 to pierwiastek z -4 , i^3 to pierwiastek kwadratowy z -9 , i^4 to pierwiastek kwadratowy z -16 i tak dalej.

Liczby urojone niektórym ludziom wydają się oszustwem, ale czy matematycy nie wymyślają często pojęć, które na pozór nie mają sensu, dopóki nauka nie znajdzie dla nich zastosowania? Przecież był taki czas, kiedy określenie „liczby ujemne” brzmiało głupio. Czy możesz posiadać pięć ujemnych przedmiotów?

Liczby ujemne nie są „prawdziwe” w tym sensie, że nie możemy ich policzyć na palcach, ale zdecydowanie się przydają. Ładunki na elektronach i protonach znoszą się do zera, zatem liczby dodatnie i ujemne to dobry układ liczbowy nadający się do wykorzystania.

Podobnie fale elektronowe działają tylko wtedy, gdy do równania włączymy liczby urojone. Jeśli metoda Schrödingera działa (a działa), to drgający wokół jądra elektron ma właściwości nie tylko w trzech wymiarach, lecz także w wymiarze urojonym. Do diabła, taka jest natura?

Urodzony wolnym³⁸

Pierwszym człowiekiem, który spróbował nadać sens temu, co w istocie przedstawia fala elektronowa, był niemiecki fizyk Max Born. Był on zaintrygowany probabilistycznym charakterem fizyki kwantowej, stanowiącym bezpośrednią konsekwencję zasady nieokreśloności Heisenberga.

Kiedy na cząstce dokonujemy pomiaru, w końcu odkrywamy jej własności (w granicach określonych zasadą Heisenberga), takie jak położenie, pęd itp., ale to, co jest naprawdę osobliwe, to fakt, że ponieważ te własności są w pewnym sensie rozmyte przed pomiarem, to powtarzanie pomiaru może dawać za każdym razem różne wyniki.

Jeśli będziesz w kółko powtarzać klasyczny (normalny) eksperyment, to będziesz otrzymywać ten sam wynik. Puść kulę

w dół po równi pochyłej, a możesz dokładnie przewidzieć, dokąd dotrze. W świecie Isaaca Newtona nie ma czegoś takiego jak prawdziwa losowość czy przypadek. Są tylko deterministyczne prawa fizyki. Dla fizyka klasycznego nawet rzut monetą nie jest przypadkowy. Siła pochodząca od kciuka, kąt nachylenia toru monety w trakcie wykonywania łuku w powietrzu, jej oddziaływanie z ziemią – wszystko to ma wpływ na to, którą stroną ona upadnie.

Jeśli masz komputer o wystarczającej mocy obliczeniowej i wprowadzisz do niego wszystkie te dane, to potrafi on z olbrzymią dokładnością przewidzieć wynik rzutu monetą. Jedynym powodem, dla którego traktujemy rzuty monetą jako przypadkowe, jest to, że nie możemy dokonać tak intensywnych obliczeń w jednej chwili. Natomiast fizyka kwantowa jest inna. Daje ona wyniki, które mają charakter prawdziwie losowy.

Być może słyszeliście powiedzonko, że „szaleństwo to powtarzanie tego samego i oczekiwanie różnych wyników”, często błędnie przypisywane Einsteinowi (faktycznie pochodzi z broszury z 1981 roku wydrukowanej przez Anonimowych Narkomanów)³⁹. Ma to jednak sens. Jak szalony musiałby być człowiek, aby powtarzać to samo w kółko, oczekując, że za każdym razem wydarzy się coś innego. Okazuje się, że równie szalony jak fizyk kwantowy.

Weźmy eksperyment z podwójną szczeliną. Na początku wystrzelisz garść elektronów/protonów/czegokolwiek w kierunku podwójnej szczeliny i otrzymujesz wzorec prążków zebry na ekranie detektora. Jednak nie możesz powiedzieć z wyprzedzeniem, w którym prążku wyląduje cząstka, gdy dotrze do ekranu – wszystko, co da się zrobić, to zgadywać na podstawie prawdopodobieństwa.

Szansa na to, że twoja cząstka dotrze do prążka centralnego, może wynosić 40 procent, następnie szansa na jej przybycie do pasm po jego obu stronach może wynosić 20 procent, na lądowanie w dwóch następnych 10 procent i tak dalej (chwilowo zapamiętaj te liczby).

W gruncie rzeczy kiedy puszczasz elektron wzdłuż jego trajektorii, jego miejsce docelowe może ulegać zmianie podczas każdego powtórzenia. Zasada nieokreśloności Heisenberga zmusza nas do porzucenia idei przewidywalnej przyszłości i zaakceptowania tego, że

to, co się dzieje, oparte jest na prawdopodobieństwie, na kaprysie jakiejś eleganckiej, choć obłąkanej kwantowej bogini. Położenie cząstki nie jest precyzyjnie określone (jest nieokreślone) dopóty, dopóki go nie zmierzymy, a kiedy wykonamy pomiar, możemy przewidzieć tylko prawdopodobne położenie, a nie absolutne.

Dlatego też Born postanowił rozwiązać równanie Schrödingera dla fali elektronowej przechodzącej przez podwójną szczelinę i odkrył, że „amplituda” fali (czyli to, jak wysoka jest ta fala) odpowiada znanym liczbom.

Prążek w środku ekranu detektora (gdzie amplituda fali jest największa) osiąga wartość 6,32. Kolejne dwa pasma po obu jego stronach mają wartość 4,47, następnie kolejne 3,16. Liczby te nie wydają się zgodne z jakimś wzorcem, ale tak nie jest: są pierwiastkami kwadratowymi liczb wyrażających prawdopodobieństwa, o których mówiliśmy przed chwilą – 40 procent, 20 procent, 10 procent i tak dalej.

Jeżeli wykonamy obliczenia Schrödingera dla fali elektronowej, a potem pomnożymy wyniki przez siebie (podniesiemy do kwadratu), to będą pasować do prawdopodobnych położzeń, w których cząsteczki wylądują na ekranie detektora.

Wydaje się, że funkcja falowa Schrödingera to pierwiastek kwadratowy z prawdopodobieństwa położenia elektronu. Ach, więc to tak. Ojej. Dzięki, Born. To wszystko wyjaśnia. Jakie to proste.

Co to w ogóle znaczy?

Zaproponowana przez Borną interpretacja równania Schrödingera sugeruje, jak się wydaje, że prawdopodobieństwo – taki ludzki wynalazek mówiący o tym, który koń mógłby wygrać wyścig – jest nieodłącznym prawem Wszechświata, któremu cząstki muszą się podporządkować.

Cząstki są zdecydowanie cząstkami, ale ich położenie jest określane przez fale prawdopodobieństwa, które ciągle ulegają zmianom. W tym ujęciu teorii kwantów musimy porzucić myśl o tym, że

cokolwiek ma określone położenie, i przyznać, że położenia są wyznaczone losowo, na podstawie praw prawdopodobieństwa.

Obszary, w których fala Schrödingera ma pik, to te, w których prawdopodobnie zostanie wykryta cząstka, a tam, gdzie fala Schrödingera ma małą amplitudę, występują miejsca, w których prawdopodobieństwo pojawienia się cząstki jest mniejsze. Elektrony, protony i fotony tak naprawdę same nie są falami, ale ich prawdopodobne lokalizacje już tak.

Nigdy nie możemy dokładnie przewidzieć, gdzie w danym momencie znajduje się cząstka, ale używając równania Schrödingera (i zakładając drgania położenia cząstek w kierunku zarówno urojonym, jak i rzeczywistym), możemy obliczyć prawdopodobny wynik naszego pomiaru.

Cząstki mogą więc być w kółko przepychane przez ten sam eksperyment, ale kończą w innym miejscu, ponieważ ich los nigdy nie jest wryty w kamieniu. Każda przyczyna ma wiele potencjalnych skutków i bogini kwantów wybiera zupełnie losowo, który z nich się wydarzy. Czasami elektron znajdzie się po jednej stronie atomu, ale ponieważ jego położenie drga w przestrzeni, może też pojawić się po drugiej stronie.

Jeśli to wszystko robi się trochę trudne i zagmatwane, to proponuję kilka zabawnych ciekawostek, które poprawią nastrój: wnuczką Maxa Borna jest Olivia Newton-John, piosenkarka i aktorka, która wystąpiła w 1978 roku z Johnem Travoltą w filmie *Grease*.

Niestety w *Grease* nie ma odniesień do fizyki kwantowej, chyba że uznamy, iż „dreszcze” są metaforą „funkcji falowej”, a kiedy mnożą się nasze dreszcze, oznacza to pomnożenie funkcji falowej przez samą siebie (podniesienie do kwadratu), aby uzyskać prawdopodobieństwo ostatecznego miejsca spoczynku elektronu.

Jeśli tak, to można by powiedzieć, że po rozwiązaniu równania Schrödingera stajemy w obliczu kryzysu filozoficznego, musimy bowiem zaakceptować wynik eksperymentu jako prawdziwie przypadkowy, a zatem „tracimy kontrolę”.

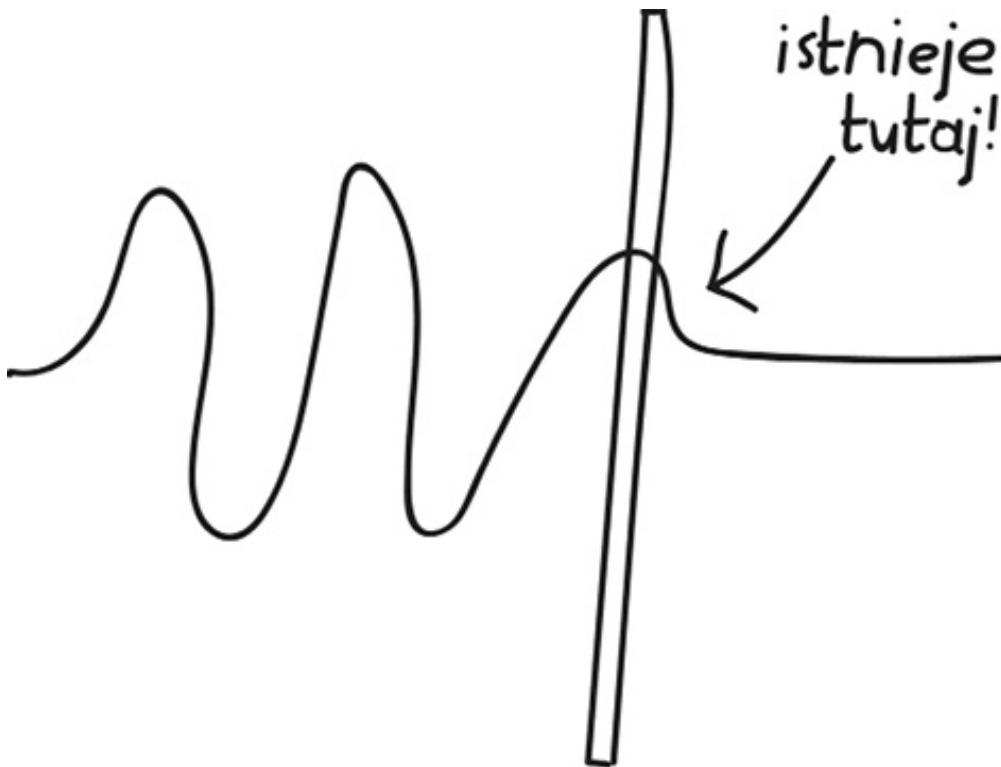
Tunelem do zwycięstwa

Opracowana przez Borna interpretacja funkcji falowej jest odważna, ale istnieje sposób, aby ją sprawdzić. Możemy rzucić cząstką w ścianę i zobaczyć, czy się przyklei.

Wyobraźmy sobie klasyczny (zwykajny) obiekt. Na przykład piłkę tenisową pędzącą w kierunku bariery. Nie ma wątpliwości, co się dalej stanie – zderzy się ze ścianą, na chwilę się tam przyklei i następnie odbije się od niej.

Interpretacja Borna sugeruje co innego w odniesieniu do cząstek kwantowych. Położenie cząstki może być opisane stale drgającą falą prawdopodobieństwa.

Jeśli rzucamy naszym elektronem w ścianę, musimy uważać go za falę. Każdy pik fali oznacza, że „cząstka prawdopodobnie tu będzie”, a każdy dół – że „cząstka prawdopodobnie tu nie będzie”. Jeśli więc nasza fala zbliży się do ściany, to niektóre z jej szczytów mogą się znajdować po drugiej stronie tej ściany, tak jak na rysunku:



Gdy cząstka dotrze do ściany, jak na powyższym rysunku, większość jej położenia pozostaje po jednej stronie (szczyty fali znajdują się przeważnie po lewej stronie), ale co jakiś czas po

drugiej stronie zbiera się maleńka jej część. Nie jest to częste zjawisko, ponieważ wartość fali jest dość niska po tej stronie (jest to tylko małe uderzenie), ale czasami elektron powinien przypadkowo pojawić się po drugiej stronie ściany.

Ten efekt, znany jako tunelowanie kwantowe, był wielokrotnie obserwowany i dokumentowany, dokładnie zgodnie z przewidywaniami Borna. Istnieje nawet urządzenie zwane złączem Josephsona, które składa się z dwóch materiałów nadprzewodzących umieszczonych po obu stronach izolatora. W normalnych warunkach elektron zostałby zablokowany przez taką barierę, ale dzięki zjawisku tunelowania możliwy jest transport elektronów przez barierę i kontrolowanie przepływu prądu dzięki zmianie grubości bariery.

Tunelowanie zajmuje sto miliardowych części sekundy⁴⁰ i jest w istocie podobne do eksperymentu z podwójną szczeliną. Częstka ma wybór: albo odbić się od ściany, albo przez nią tunelować, tak jak ma wybór, przez którą szczelinę przelecieć. Jedyna różnica polega na tym, że w eksperymencie z podwójną szczeliną prawdopodobieństwo dla każdej szczeliny wynosi 50 procent, a w powyższym scenariuszu tunelowania prawdopodobieństwo przejścia przez barierę jest bardzo niskie, rzadko więc się z nim spotykamy.

Tunelowanie wyjaśnia również, skąd pochodzi radioaktywność. Jądro atomu może czasami losowo wyrzucić kilka protonów i neutronów (takie zjawisko nazywa się promieniowaniem alfa). Nie byłoby to możliwe według fizyki klasycznej, ponieważ protony i neutrony nigdy nie przeszłyby obok innych protonów i neutronów otaczających je w jądrze.

Teraz jednak możemy opisać wszystkie położenia cząstek za pomocą funkcji falowej, a mała jej część może wystawać poza atom. Cząstki raz na jakiś czas losowo tunelują do krawędzi atomu i magicznie pojawiają się na zewnątrz niego – właśnie na tym polega emisja promieniowania radioaktywnego.

Dobieraj właściwe słowa

Przed 1926 rokiem teoria kwantów była wiązką luźno złączonych wątków, a Schrödinger stał się tym gościem, który je wszystkie powiązał. To on wykazał, że dualizm korpuskularno-falowy jest związany z poziomami energetycznymi powłok elektronowych... co wyjaśniło kształty orbitali atomowych i całą chemię... pozwalając na przewidywanie własności cząstek przez określanie prawdopodobieństwa.

W niektórych kręgach panuje zgoda co do tego, że wczesna generacja fizyków kwantowych, takich jak Planck, Einstein, de Broglie i Bohr, pracowała nad „teorią kwantów”, podczas gdy bardziej wyrafinowane procesy, odkryte przez Schrödingera, Borna i Heisenberga, stworzyły „mechanikę kwantową”.

Większości ludzi nie obchodzi to rozróżnienie i mechanika kwantowa służy zazwyczaj jako termin ogólny zarówno dla fizyki przed rokiem 1926, jak i po nim. Jednak zadaniem purystów teoria kwantów zaczęła się od Plancka, a mechanika kwantowa od Schrödingera.

³³ W. Moore, *Schrödinger: Life and Thought*, Cambridge University Press, Cambridge 1989.

³⁴ Ibidem.

³⁵ E. Schrödinger, *An Undulating Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules*, „Physical Review” 1926, t. 28, nr 6.

³⁶ Ibidem.

³⁷ M. Brooks, *The Quantum Astrologer's Handbook*, Scribe, Brunswick 2017.

³⁸ W oryginale *Born free*: gra słów związana z nazwiskiem Borna i angielskim słowem *born* – urodzony (przyp. red.).

³⁹ Narcotics Anonymous, *World Service Conference of Narcotics Anonymous* (listopad 1981), dostępne na: https://web.archive.org/web/20121202030403/http://www.anonymifoundation.org/uploads/NA_Astrroval_Form_Scan.pdf (dostęp 15 grudnia 2018 r.).

⁴⁰ N. Camus i inni, *Experimental Evidence for Quantum Tunnelling Time*, „Physical Review Letters” 2017, t. 119, s. 23201.

Rozdział 5

Rzeczy stają się jeszcze dziwniejsze... Znowu

Wszystko, co wiemy, jest błędne

Być może już zauważyliście, że każda teoria w mechanice kwantowej pokrótce okazywała się błędna. Komuś niezaznajomionemu z nauką może się to wydawać niepokojące, wygląda bowiem tak, jakby naukowcy byli w ciągłym stanie nieokreśloności (czy kogokolwiek interesuje ten kalambur Heisenberga?), ale to jest normalny stan rzeczy.

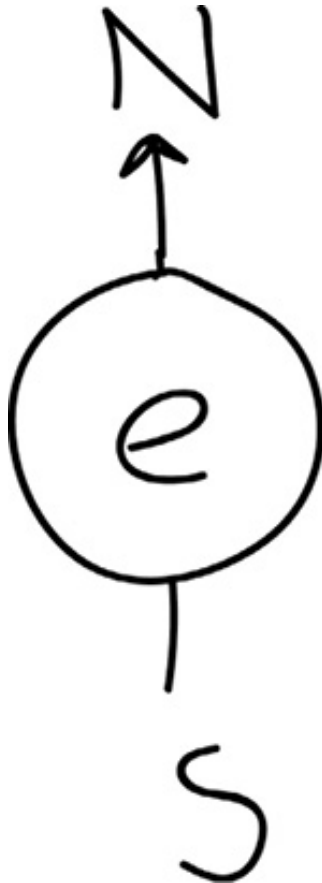
Naukowcy najlepiej pracują nad ideą, sprawdzając jej poprawność na granicy stosowalności, wtedy kiedy zaczyna być już błędna, gdyż ciekawość naukowa jest najważniejsza, a żaden fakt nie jest nienaruszalny. Zawsze lepiej mieć do idei zaufanie niż pewność, wówczas bowiem łatwiej przyznać się do pomyłki. Równanie Schrödingera, mimo całej jego świetności, nie jest inne.

Kiedy Schrödinger je opublikował, jawnie zignorował ładunek elektronu, ponieważ jest on stały i nie trzeba go dopasowywać. Oznacza to jednak, że równanie rozsypuje się, gdy elektron znajdzie się w pobliżu magnesu.

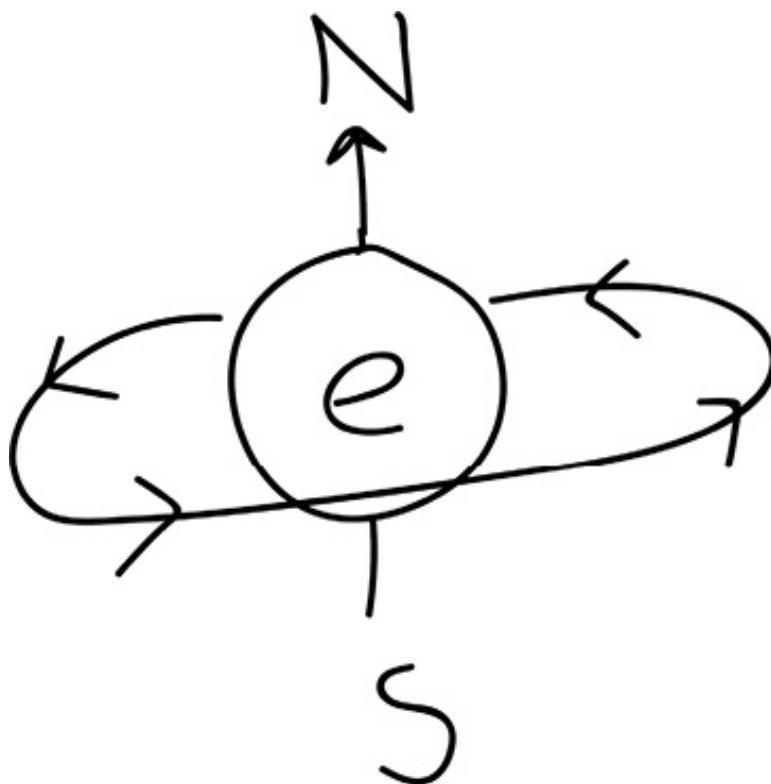
Magnetyzm oraz ładunki elektryczne mają na siebie silny wpływ. Ruchomy magnes może nakłonić elektrony do przepływu przewodem elektrycznym, a płynący prąd elektryczny wytworzy pole magnetyczne. Dlatego równanie, które opisuje elektron, ale ignoruje efekty magnetyczne, jest niekompletne.

Kręć mną wokół

W rozdziale 11 zbadamy związek między ładunkiem elektrycznym a magnetyzmem, ale na razie wiemy, że elektrony wytwarzają wokół siebie pole magnetyczne tak jak magnesy sztabkowe mające biegun północny na jednym końcu i południowy na drugim. Lubię myśleć o elektronach, że są nadziane na mały harpun idący przez ich środki i wskazujący, w którą stronę biegną linie pola magnetycznego:



Pole magnetyczne może być utworzone przez prąd elektryczny płynący w pętli przewodzącej, przyjęto więc założenie, że właściwości magnetyczne pojedynczego elektronu muszą powstawać w podobny sposób. Aby utworzyć bieguny magnetyczne, elektrony muszą zatem stale wirować jak żyroskop.



Niestety, kiedy obliczamy, jak duży musiałby być promień elektronu, aby wytworzyć pole magnetyczne o odpowiedniej wielkości, otrzymujemy wynik, że musi być on większy niż cały atom. A zatem istnienie pola magnetycznego elektronu na skutek jego wirowania wokół osi jest wyraźnie błędnym wytłumaczeniem.

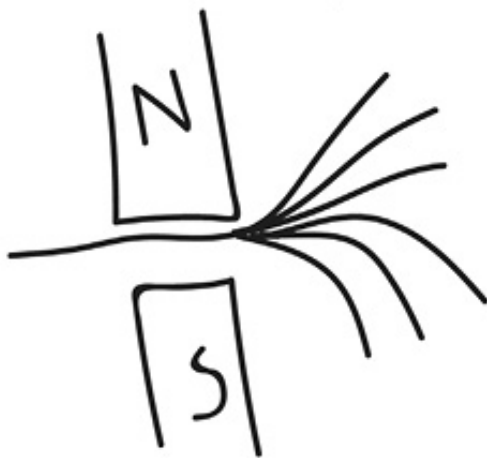
Magnetyzm elektronu musi być spowodowany jakąś tajemniczą jego własnością oprócz tego, że ma on ładunek, ale zanim zdaliśmy sobie z tego sprawę, wszyscy już wyobrażali sobie wirujące elektrony, nazwaliśmy więc tę tajemniczą własność „spinem elektronowym”. Nie oznacza to dosłownie, że elektron wiruje wokół osi, to tylko pojęcie, którego używamy, by podkreślić magnetyczną naturę elektronu.

W celu zbadania, jakie właściwości ma ten „spin”, dwaj niemieccy badacze, Otto Stern i Walther Gerlach, postanowili zmierzyć spin cząstek, wystrzeliliując je przez bramkę w poprzecznie do niej przyłożone silnie niejednorodne pole magnetyczne, tak aby cząstka poddana została sile wytworzonej przez oddziaływanie pola z jej momentem magnetycznym.

Ponieważ cząstka magnetyczna została wystrzelona przez bramkę i przeszła przez pole magnetyczne, jej tor lotu powinien być odchylony pod pewnym kątem, zależnym od tego, jak bardzo „wirowała” w tym momencie. Wiemy jednak, że nie jest to dosłownie cząsteczka wirująca. Czymkolwiek wszakże jest spin, powinien mieć wiele różnych wartości, a zatem cząsteczki powinny się odchyłać pod różnymi kątami.

Zamiast tego Stern i Gerlach stwierdzili, że cząsteczki leciały tylko w dwóch kierunkach. Spin (cokolwiek to jest) jest zawsze tej samej wielkości i skierowany albo zgodnie z kierunkiem pola magnetycznego, albo do niego przeciwnie. A tu nie było żadnych wartości pośrednich, co oznacza, że spin, podobnie jak energia, jest kolejną własnością skwantowaną⁴¹.

wynik
oczekiwany



wynik
rzeczywisty



W tym momencie sensowne byłoby zaprzestanie używania słowa spin i odniesienie się do tej własności jako do ładunku magnetycznego lub czegoś takiego. Mimo to każdy uparcie trzymał się terminu spin i aby wyciągnąć superekstrapomocną dłoń, Stern i Gerlach zamiast nazwać te dwa typy zgodnym z ruchem wskazówek zegara i przeciwnym do niego, określili je jako „spin w górę” i „spin w dół” (zob. dodatek 1, w którym znajdziesz bardziej szczegółowo omówiony spin i magnetyzm).

Aby uwzględnić spin, fizyk Wolfgang Pauli odpowiednio zmodyfikował równanie Schrödingera, otrzymując tak zwane równanie Pauliego.

Pauli znany był ze swej nieudolności w wykonywaniu eksperymentów, większej nawet niż Heisenberg, i to w takim stopniu, że koledzy mówili o „efekcie Pauliego”, gdy sprzęt ulegał awarii, on zaś znajdował się w jego pobliżu. Jednakże podobnie jak Heisenberg, był on *par excellence* fizykiem teoretykiem, a jego modyfikacja dała wspaniałe równanie.

Równanie Schrödingera określa prawdopodobne położenie cząstki, kiedy ją mierzymy, a w wersji Pauliego opisuje jej prawdopodobny spin. Nasza definicja „funkcji falowej” powinna być w istocie rozszerzona, tak aby odnosiła się do wszystkich własności cząstki: spinu, energii, pędu, położenia, ulubionego filmu i czegokolwiek innego, co chcemy o niej wiedzieć.

Wybór elektronu

Za pomocą urządzenia Sterna–Gerlacha podzieliliśmy zatem elektrony na dwie wiązki ze względu na ich spin i doprowadziliśmy do tego, że występują w proporcji pół na pół. Niektóre elektrony mają spin w górę, a inne w dół. Teraz wyobraź sobie, że bierzemy tylko wiązkę elektronów ze spinem w górę i przepuszczamy je przez drugą bramkę. Tak dla zabawy.

Każdy elektron w tej wiązce przechodzi przez bramkę po linii prostej, tak jak się oczekuje. Wysyłamy elektrony ze spinem w górę, naturalnie więc wszystkie wychodzą wyłącznie ze spinem w górę. Teraz jednak założmy, że obrócimy drugą bramkę o 90 stopni. Wiązka elektronów ze spinem w górę rozdziela się na dwie części, tym razem lecą w lewo lub w prawo.

Spin jest najwyraźniej określony wzdłuż dowolnej osi, na którą patrzymy, zatem oczywiście jeśli ustawimy magnesy poziomo, to powinna się pojawić lewa i prawa wiązka.

Podzieliliśmy wszystkie nasze elektrony na dwie kategorie, na te ze spinem w górę i te ze spinem w dół, a potem dokonaliśmy

podpodziału tych ze spinem w górę na lewe i prawe.

Weźmy teraz górną lewą wiązkę elektronów i przepuścimy ją przez jeszcze jedną bramkę, tym razem ustawioną pionowo jak pierwsza. Mamy strumień elektronów ze spinem w górę i w lewo przechodzący przez bramkę ustawioną pionowo, najwyraźniej więc powinniśmy po drugiej stronie otrzymać pojedynczą wiązkę elektronów ze spinem w górę. A właśnie, że nie: 50 procent elektronów ma spin w dół.

*Never Let Them Get You Down*⁴²

Wyobraź sobie, że mamy kilkanaście osób i wysyłamy je do szpitala na określenie ich grupy krwi. Najpierw dokonujemy selekcji, która oddziela tych z grupą A od tych z grupą B. Następnie bierzemy ludzi z grupą A i selekcjonujemy u nich podgrupy A+ i A-. Gdy tego dokonaliśmy, zabieramy ludzi z podgrupą A+ i wysyłamy na powtórne badanie, tylko po to, aby odkryć, że niektórzy z nich spontanicznie przekształcili swoją krew w grupę B. To jest właśnie to, co elektrony najwyraźniej robią ze swoim spinem. Ale jak to się może dziać?

Otóż założyliśmy, że kiedy elektrony ze spinem w górę przelatują przez bramkę lewą /prawą, to wynurzą się z nietkniętym kierunkiem spinu. To jednak nie wyjaśnia, co tak naprawdę obserwujemy. Technicznie rzecz biorąc, kiedy elektrony przelatują przez bramkę lewą/prawą, to po drugiej stronie na pewno obserwujemy ich lewy/prawy spin. Nie wiemy już, czy ich spin był w górę/w dół, nie ma więc powodu, by zakładać, że nadal taki jest. Wygląda na to, że pomiar lewego/prawego spinu elektronu powoduje, iż zapomina on o swoim spinie w górę/w dół.

Przedstawia nam to nową relację nieokreśloności Heisenberga: nigdy nie możemy jednocześnie poznać dwóch osi spinu cząstki. Pionowy i poziomy spin może być mierzony indywidualnie, ale pomiar jednego z nich rozmazuje drugi, tak samo jak pomiar położenia cząstki rozmazuje jej pęd. W dodatku dzieje się coś jeszcze dziwniejszego.

Własności cząstki zostają wymazane, jeśli mierzymy jej własność komplementarną, co oznaczałoby, że sam akt pomiaru w jakiś sposób wpływa na to, iż przede wszystkim to cząstka wybiera własność.

Eksperyment Sterna–Gerlacha wskazuje, że niemierzony spin ulega zagubieniu i możemy go odzyskać tylko przez ponowny pomiar. Faktycznie, gdy nie patrzymy na cząstki, ich własności dosłownie nie występują. Co oznacza, że w starożytnej idei Empedoklesa, jakoby nasze oczy sprawiały, iż obiekt ma wygląd, może zawierać się jakieś ziarno prawdy.

Patrzysz uważnie?

Patrząc wstecz na eksperyment z podwójną szczeliną, musimy się zastanowić, czy dobrze go zrozumieliśmy. Założyliśmy, że cząstka miała konkretne położenie, gdy przechodziła przez podwójną szczelinę, ale może go nie miała. Może wynik doświadczenia z podwójną szczeliną bierze się z tego, że elektron w ogóle nie jest elektronem, tylko istnieje w jakimś dziwacznym stanie, stając się cząstką o wyraźnie określonych własnościach tylko wtedy, gdy zaobserwujemy go na ekranie detektora.

Równanie falowe Schrödingera pozwala nam obliczyć prawdopodobieństwo konkretnego wyniku, ale dopóki nie zmierzmy tego wyniku, dopóty nic nie jest postanowione. Cząstka nie przechodzi przez żadną ze szczelin, ponieważ jeszcze nie ma ona określonych własności.

To, co naprawdę powinniśmy zrobić, to postawić jakąś maleńką kamerę obok każdej ze szczelin i obserwować, co robi cząstka w momencie podejmowania decyzji. Jeśli cząstka jest tam naprawdę, to powinniśmy być w stanie zaobserwować, jak dokonuje wyboru. Teraz, kiedy to mówimy, wydaje się to całkiem oczywiste.

W porządku, przyznam się do czegoś. W eksperymencie, o którym mowa, tak naprawdę nie ustawia się małych kamer obok szczelin, ale opisanie specyfiki pomiaru na podwójnej szczelinie jest dość

żmudne, na razie więc wyobraźmy sobie, że naprawdę wykonano taki pomiar z miniaturowymi kamerami.

Przed wynikami doświadczenia Sterna i Gerlacha spodziewalibyśmy się nagrać materiał filmowy o cząstce przechodzącej przez obie szczeliny naraz. A w istocie otrzymuje się jeden z najbardziej osobliwych wyników w fizyce. Gdy kamera filmuje szczeliny, elektrony nagle przechodzą jeden po drugim jak klasyczne cząstki, a kwantowy wzorec prążków zebry zanika.

Umieszczenie kamery przy szczelinach jest formą pomiaru, który w jakiś sposób powoduje, że cząstka staje się cząstką. Kiedy ich nie filmujemy, cząstki mają charakter falowy, ale w momencie włączenia kamery wracają do normalnego zachowania. Takiego zachowania oczekujemy od polityków, ale nie od cząstek. W imię ducha Maxa Plancka, skąd cząstka wie, czy nasza kamera jest włączona, czy nie?

Z oczywistych powodów ten fakt jest znany jako „problem pomiaru”. Kiedy nie obserwujemy cząstki, jej pęd, energia, spin, a nawet położenie znajdują się w jakiejś nieokreślonej nicości, której nigdy bezpośrednio nie doświadczamy. Mierzenie ich w jakiś sposób zmusza je do przyjęcia wartości w świecie rzeczywistym. Cząstkom najwyraźniej zależy, aby zwracać na nie uwagę.

⁴¹ W. Gerlach, O. Stern, *Der Experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld*, „Zeitschrift für Physik” 1922, t. 9, s. 349–352.

⁴² Tytuł piosenki Etany z albumu *People Talk*. W luźnym tłumaczeniu: „Nigdy nie daj im się zdołować” (przyp. tłum.).

Rozdział 6

Kicia w pudle

Duński sposób

W miarę jak przybywało obserwacji i utrwalaly się równania, pojawiły się dwa obozy, każdy z własnym poglądem na to, jak radzić sobie z tym dziwactwem.

W jednym obozie byli filozofowie, którzy chcieli zrozumieć prawdziwą naturę mechaniki kwantowej. Uczeń tacy jak Einstein, Schrödinger i de Broglie.

W drugim obozie znaleźli się analitycy, tacy jak Bohr i Heisenberg, obaj pracujący w Kopenhadze, którzy chcieli korzystać z mechaniki kwantowej, nie martwiąc się o filozoficzne znaczenie tego wszystkiego.

W 1930 roku Heisenberg napisał książkę zatytułowaną *Physikalische Prinzipien der Quantentheorie* (Fizyczne zasady teorii kwantów), podsumowując w niej stanowisko, które on i Bohr wypracowywali latami. Mówił o ich wizji „das Kopenhagen Geist”, co dosłownie można przełożyć jako: „duch kopenhaski”, mimo że słowa takie jak dusza czy charakter są bardziej zgodne z jego własnym poglądem. Obawiam się, że mechanika kwantowa nie udowadnia, iż duchy są prawdziwe, chociaż podaje całkiem niezły przykład nieumarłych (czekajcie dalszych informacji).

„Kopenhaska interpretacja” mechaniki kwantowej jest podejściem pragmatycznym, które mówi, że głębokie prawa fizyki są zbyt

niedostępne dla ludzkiego doświadczenia, nigdy więc ich nie zrozumiemy.

Utrzymuje ona, że tak jak kolory, mieszając się, tworzą biel, własności cząstek można zmieszać, wytwarzając „stan superpozycji”, w którym nie ma ona spinu w górę lub w dół ani nie przebywa tu, ani tam. I jest to jednocześnie wszystko, a zarazem nic.

Według słów Heisenberga: „Same cząstki nie są prawdziwe; tworzą one raczej świat możliwości, a nie jeden z obiektów lub fakty”⁴³.

Cząstki nie dbają o to, czy mają dla nas sens, i nie dostosowują się do naszych ludzkich ograniczeń, zatem nie mamy innego wyboru, niż tylko wziąć je takie, jakie są. Albo zakochujesz się w tym, co widzisz, albo uciekasz z krzykiem. Funkcje falowe istnieją częściowo realnie, częściowo w sposób urojony, pomiar je zmienia i w tej sprawie nie ma już do powiedzenia nic więcej. Koniec dyskusji.

Podsumowując

To irytujące, że Bohr i Heisenberg nigdy w pełni nie określili wszystkich szczegółów swego podejścia do mechaniki kwantowej. Czasami można je skonkretyzować w określonych przypadkach, ale podobnie jak robią to same cząstki kwantowe, utrzymywali wszystko w stanie nieokreśloności, zamiast pomóc go rozwikłać. Jednak teraz ogólnie naszkicujemy to, w co oni wierzyli.

Natura, gdy nie jest mierzona, istnieje w mnogości stanów (lub ich braku) nazywanej superpozycją, ale kiedy dokonujemy pomiaru, rozginiemy tę superpozycję jak muchę packą na suficie, zmuszając naturę, by określiła się w jednym stanie.

Równanie Schrödingera mówi nam o prawdopodobnym wyniku pomiaru, ale nic nie zostaje rozstrzygnięte dopóty, dopóki się go nie dokona, wówczas zaś mówimy, że superpozycja, jak pękający bąbelek, doznaje „kolapsu” do jednego stanu. To, co pozostaje, jest zwykłą wersją cząstki i nazywane jest często stanem własnym cząstki. I jest to to, z czym mamy do czynienia w fizyce klasycznej, tyle że w odróżnieniu od fizyki klasycznej, zanim dokonamy pomiaru, musimy posłużyć się falami prawdopodobieństwa.

Nie da się też powiedzieć, w który stan własny funkcja falowa cząstki dozna kolapsu, ponieważ sam Wszechświat nie zdecydował. Po prostu dokonujemy pomiaru i patrzymy na to, co się stanie. Taki właśnie mechanizm przyśnił się w nocy Bohrowi i Heisenbergowi.

Interpretacja kopenhaska jest dla wielu fizyków obrzydliwym oszustwem. Nic nie wyjaśnia i każe ci po prostu zadowolić się niewiedzą. Krytycy nazywają ją podejściem typu „zamknij się i licz”⁴⁴, ponieważ obchodzi ona szerokim łukiem intuicję i wprost zaleca używanie równań na oślep, co nie wydaje się właściwym rozwiązaniem. Wątpliwości, które wynikają z interpretacji kopenhaskiej, mają także głęboki sens:

1. W jaki sposób cząstka może istnieć w wielu stanach lub w żadnym?
2. Dlaczego pomiar powoduje uwięzienie cząstki w jednym stanie własnym?
3. Dlaczego ten wynik jest przypadkowy?
4. Dlaczego nie możemy poznać wszystkich własności jednocześnie?
5. Dlaczego świat codzienny podlega prostym prawom klasycznym, jeśli cząstki, z których jest zbudowany, im nie podlegają?

Interpretacja kopenhaska odpowiada na wszystkie pięć pytań wzruszeniem ramion i stwierdzeniem: „Tak już jest, chłopie”. Jednak na niektórych to nie podziałało, a już na pewno nie na Einsteina.

Dość tego!

Einsteina i Bohra łączyły skomplikowane relacje osobiste. Szanowali nawzajem swe intelekty, ale gwałtownie nie zgadzali się w sprawach dotyczących mechaniki kwantowej. Na każdej konferencji, w której uczestniczyli, dochodziło do sporów, a potem pisali mnóstwo

upublicznianych listów o tym, jak bardzo się mylił ten drugi. Gdyby Twitter został już wtedy wynaleziony, ich słowny sparing rywalizowałyby z takimi waśniami jak pojedynek między Seleną Gomez i Justinem Bieberem czy Kanye Westem i całym Internetem.

W pewnym słynnym liście do Maxa Borna Einstein napisał, że nie może zaakceptować teorii, która sprawiła, że natura ma charakter losowy, i zakończył go słowami: „Ta teoria oferuje mnóstwo pomysłów, ale nie przybliża nas ani o włos do sekretów Przedwiecznego. Ja w każdym razie jestem przekonany, że On nie gra w kości”⁴⁵. Einstein posłużył się tu słowem „On” na określenie bezosobowej postaci Boga.

Według Heisenberga, który był dobrym przyjacielem obu uczonych, Bohr, kiedy dowiedział się o tym, że Einstein upiera się, iż Bóg nie gra w kości, stwierdził: „Nie naszą sprawą jest zalecanie Bogu, jak ma rządzić światem”⁴⁶.

Księżyc, piękny

Sprzeciw Einsteina wobec interpretacji kopenhaskiej wynikał z tego, że jego zdaniem celem fizyki jest ustalenie, jak działa natura. Natura mówi nam coś przez mechanikę kwantową, a my musimy się dowiedzieć co. W jego mniemaniu Bohr poddawał się, gdy rzeczy przybierały interesujący obrót.

W jednej z gorących wymian zdań ze zwolennikiem interpretacji kopenhaskiej, Abrahamem Paisem, Einstein zwrócił uwagę na niedorzeczny aspekt problemu pomiaru i zapytał Paisa, czy uważa, że księżyc przestaje istnieć, gdy na niego nie patrzy⁴⁷. W interpretacji kopenhaskiej obiekty nie mają zdefiniowanych własności dopóty, dopóki nie zostaną zmierzone, jeśli więc nikt nie obserwuje księżyca, to jego funkcja falowa jest w stanie superpozycji, a zatem istnieje on w różnych miejscach i stanach jednocześnie.

Sęk w tym, że jest to bardziej instynktowny sprzeciw niż dowód. Nasza wiara w to, że księżyc istnieje, gdy nań nie patrzymy, nie

dowodzi tego, iż on istnieje. Dlaczego księżyc nie miałby zniknąć, skoro nikt go nie mierzy? Czy można udowodnić, że tak nie jest?

Z perspektywy Bohra umysły ludzkie ewoluowały po to, aby usprawnić poszukiwania jagód na równinach Afryki, a nie po to, aby zajmować się zaawansowaną fizyką. Prędzej czy później musieliśmy się natknąć na jakiś mur. Istota ludzka próbująca zrozumieć mechanikę kwantową byłaby jak domowy termostat próbujący zrozumieć fabułę filmu *Quantum of Solace* z Jamesem Bondem. Pomyślcie tylko, to tak jakby człowiek próbował zrozumieć fabułę filmu *Quantum of Solace*. To po prostu niemożliwe.

Obraz tych debat przenikający do publicznej świadomości ukazywał Einsteina jako uczonego, który ma najlepsze lata za sobą, a Bohra jako triumfującego. W pewnych relacjach Einstein jest nieźyczliwie przedstawiany jako człowiek niegdyś wielki, teraz niebędący już w awangardzie fizyki, perorujący o tym, jak to w jego czasach nauka była lepsza.

Prawdopodobnie niektórym daje to poczucie satysfakcji, ponieważ miło jest wiedzieć, że Einstein miał jakieś ograniczenia, ale w rzeczywistości doskonale uchwycił on mechanikę kwantową. Dlatego tak bardzo starał się znaleźć w niej błąd – wiedział bowiem, co nim naprawdę było.

Ośławiony kot zombie Schrödingera

Kości, w które według Einsteina grał Bóg, i skaczący Księżyc zostały zlekceważone przez Bohra jako zastrzeżenia podyktowane emocjami, które nie miały żadnego znaczenia dla faktów naukowych. Wówczas na walkę z kopenhaskim molochem zdecydował się Schrödinger.

Lubię sobie wyobrażać, jak wspierany przez mały harem cheerleaderek, z których pięć jest z nim w ciąży, poprawia muszkę, podwija rękawy i zmieniając Einsteina w ringu zapaśniczym, mówi coś w stylu: „Odsuń się Albi, teraz ja, Schrödinger, zajmę się tym”.

Schrödinger postanowił pójść inną drogą i zaatakował superpozycję, a nie pomiar. W listopadowym wydaniu „Naturwissenschaften” z 1935 roku opublikował pracę, która

powinna, jak twierdził, zrujnować na zawsze interpretację kopenhaską. Przedstawił w niej to, co teraz znane jest jako paradoks kota Schrödingera.

Wyobraźmy sobie kota zamkniętego przez godzinę w stalowym pudle. Wewnątrz pudła umieszczony jest materiał radioaktywny, a obok niego licznik Geigera, który wykrywa, czy z materiału została wyemitowana jakaś cząstka, czy też nie. Nie da się przewidzieć, czy emisja nastąpi w ciągu godziny, ale możemy wybrać materiał, którego funkcja falowa daje 50 procent prawdopodobieństwa emisji po tym czasie.

50 procent wynosi prawdopodobieństwo tego, że cząstka znajduje się w jądrze, ale też 50 procent wynosi prawdopodobieństwo tego, że cząstka dzięki tunelowaniu wydostanie się z jądra i wpadnie do licznika. W tym miejscu robi się ciekawie. Licznik Geigera jest sprzężony z piekielnym urządzeniem, które spuszcza wówczas młotek i rozbija obok kota fiolkę kwasu cyjanowodorowego.

Interpretacja kopenhaska mówi, że cząstka wybiera obie opcje, w stanie superpozycji znajduje się wewnątrz jądra oraz na zewnątrz niego, zatem młotek jednocześnie opadł i nie opadł. Oznacza to, że fiolka z kwasem jest jednocześnie rozbita i nierozbita, a kot – jednocześnie martwy i żywy. Jeżeli poważnie traktuje się interpretację kopenhaską, to trzeba zaakceptować ten absurd. Superpozycja musi być błędna.

Nie wiem, dlaczego Schrödinger nie wymyślił czegoś działającego błyskawicznie, czegoś, co zabiłoby kota bezboleśnie, lecz zdecydował się mordować go w ciągu kilku minut za pomocą cyjanku. Schrödinger to był dziwny facet.

Nie jest również jasne, dlaczego wybrał kota. Był właścicielem psa wabiącego się Burschie⁴⁸ i są tacy, którzy twierdzą, że miał kota Milтона⁴⁹, ale mogą być to informacje apokryficzne. Być może pewnego ranka pisał swój artykuł, kiedy Milton uznał, że to dobra chwila, by mu zrobić kupę na biurku, a wtedy Schrödinger uwiecznił go po wsze czasy. Kto to wie?

Czasami eksperyment myślowy z kotem Schrödingera jest błędnie rozumiany w takim sensie: „nie wiesz, czy kot jest żywy, czy martwy,

musisz więc go sobie wyobrazić w obu stanach”. Jednak nie o to tu chodzi.

Interpretacja kopenhaska stwierdza dosłownie, że cząstka może znajdować się w stanie superpozycji, co oznacza, że wszystko, co z nią oddziałuje, może również znajdować się w stanie superpozycji. Kiedy otwierasz pudło, dokonujesz kolapsu funkcji falowej kota do jego stanu własnego z 50-procentowym prawdopodobieństwem tego, że jest żywy, oraz 50-procentowym prawdopodobieństwem tego, że jest martwy, ale zanim to nastąpi, pozostaje on w obu stanach jednocześnie.

Dlatego przeprowadzenie eksperymentu w rzeczywistości byłoby bezcelowe. Kota Schrödingera nigdy nie zaobserwowano by w superpozycji, ponieważ o to właśnie chodzi w interpretacji kopenhaskiej – mierzy się stan własny, do którego losowo następuje kolaps superpozycji stanów, a nie samą superpozycję stanów. Otwarcie pudła w realnym świecie nie wykaże superpozycji martwy/żywy, lecz klasyczny stan własny albo żywej kici, albo martwej i wyrzutów sumienia.

[43](#) R. Kastern, *The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge 2012.

[44](#) N.D. Mermin, *What's Wrong with this Pillow?*, „Physics Today” 1989, t. 42, nr 4.

[45](#) I. Born, *The Born–Einstein Letters*, Walker and Company, Nowy Jork 1971, tu cyt. za: W. Isaacson, *Einstein. Jego życie, jego wszechświat*, przeł. J. Skowroński, Wydawnictwo W.A.B., Warszawa 2010, s. 327 (przyp. red.).

[46](#) W. Heisenberg, *Physics and Beyond*, przeł. A. Pomerans, Harper and Row, Nowy Jork 1971.

[47](#) D. Lindley, *Where Does the Weirdness Go?*, Vintage, Nowy Jork 1997.

[48](#) Ze wspomnień Ruth Braunizer, córki Erwina Schrödingera, „Memories of Dublin”, zebranych przez G. Holfter (red.), *German Speaking Exiles in Ireland 1933–1945* (Amsterdam, Rodopi, 2006).

[49](#) C. McDonnell, „Schrödinger’s Cat”, *GITC Review*, vol. 13, nr 1 (2014).

Rozdział 7

Świat jest iluzją

Teraz mnie widzisz, a teraz nie

Film Disneya i Pixara *Toy Story* oraz jego kontynuacje w istocie są o mechanice kwantowej. Ich głównymi bohaterami są zabawki, które obserwowane przez ich właściciela, Andy'ego, zachowują się jak zwykłe zabawki, ale ożywają, kiedy przestaje on na nie patrzeć.

Andy nigdy nie widzi zabawek w stanie ożywienia, tylko obserwuje zawsze ich klasyczne zachowanie. Nigdy również nie zauważa, że zmieniają one swoje położenia pomiędzy każdą z zabaw (nie jest on niestety zbyt spostrzegawczym dzieciakiem). Gdyby jednak przyglądał się uważniej, mógłby dostrzec, że za każdym razem gdy obserwuje swoje zabawki, są one w nieco innym miejscu.

Cząstki są podobne. Kiedy odwracamy od nich wzrok, wydaje się, że robią coś zupełnie innego, niż kiedy na nie patrzymy. Możemy zgadywać, gdzie mogą się w końcu znaleźć, używając równania Schrödingera, ale nigdy nie uda się przewidzieć dokładnie, co się stanie za każdym razem, kiedy wchodzimy do pokoju.

Założmy, że Andy za każdym razem zapisuje, gdzie podziewa się każda zabawka i w jakim jest stanie. Zacząłby zwracać uwagę na to, że ich zaobserwowany stan potrafi opisać jedynie w kategoriach prawdopodobieństwa. Na przykład mógłby odnotować 90-procentowe prawdopodobieństwo, że Chudy będzie tam, gdzie Andy zostawił go ostatnio, ale nie wykluczając (prawdopodobieństwo nie

jest zerowe), że Chudy jest teraz po drugiej stronie pokoju, a nawet gdzieś na zewnątrz budynku.

Gdyby Andy był zwolennikiem interpretacji kopenhaskiej, wymyśliłby zgrabne matematyczne wyjaśnienie tego, co się dzieje. Jego zabawki istnieją we wszystkich miejscach jednocześnie, ułożone w każdej możliwej konfiguracji, aż do chwili gdy on wchodzi do pomieszczenia, w tym bowiem momencie ich superpozycje doznają kolapsu do czegoś klasycznego. Tu jednak pojawia się mnóstwo pytań: O co chodzi z tą obecnością Andy'ego w pomieszczeniu, która powoduje, że funkcje falowe zabawek ulegają zmianie?

W pierwszym filmie *Toy Story* jest taka scena, w której Chudy wyjaśnia grupie innych zabawek, że będą musiały złamać „zasady” bycia zabawką. Czym właściwie są te zasady i kto je ustala?

Jeśli ustawimy kamerę w sypialni Andy'ego, to czy zabawki ożyją? A co, jeśli będą obserwowane od tyłu i nie będą o tym wiedzieć? Dlaczego pozostają w stanie ożywienia, kiedy inna zabawka je obserwuje? Dlaczego pies Buster się tu nie liczy? A co z robotem obdarzonym sztuczną inteligencją? Czy szympanś wywołałby kolaps? A co z tym fragmentem, w którym złe dziecko Sid widzi Chudego rozmawiającego i doznaje załamania nerwowego, co powoduje jego rezygnację z nauki w szkole i wybór pracy w firmie zajmującej się wywozem śmieci w *Toy Story 3*? (Uważaj, to zdecydowanie Sid we własnej osobie).

Próba zrozumienia filozoficznych implikacji pomiarów we wszechświecie *Toy Story* jest koszmarem, ale właśnie z tym mamy do czynienia w mechanice kwantowej. Problem pomiaru jest nie tylko kontrintuicyjny, lecz także rodzi poważne pytania o to, co sprawia, że rzeczywistość jest realna.

Czasami problem pomiaru miesza się z zasadą nieokreśloności Heisenberga, ale nie są one takie same. Problem pomiaru mówi, że cząstka wybiera, w jakim stanie ma się znajdować, gdy jest obserwowana, zasada nieokreśloności mówi, że nawet gdy dokonujemy tej obserwacji, tracimy wszystkie inne informacje na jej temat.

Analogią dla zasady nieokreśloności Heisenberga byłoby stwierdzenie, że Andy ma problem z oczami i potrzebuje specjalnie

przyciemnianych okularów, aby dobrze widzieć. Kiedy patrzy na swoje zabawki bez tych okularów, może powiedzieć, jaki mają kolor, ale ich obraz jest zamazany. Gdy ma pewność ich koloru, traci pewność dotyczącą kształtu. Jeśli nałoży okulary, zabawki stają się ostro widoczne, ale on patrzy przez kolorowane szkło i nie może już powiedzieć, jaki mają kolor. Może zdecydować się na pomiar koloru lub kształtu, ale nigdy obu naraz.

Masz we mnie przyjaciela

W 1932 roku fizyk John von Neumann postanowił rozłożyć na czynniki pierwsze eksperyment z podwójną szczeliną i dokonać matematycznej analizy każdego jego etapu, aby się dowiedzieć, co jest odpowiedzialne za powodowanie kolapsu funkcji falowej. Jakiś aspekt procesu pomiarowego musiał tu odgrywać szczególną rolę.

Uczony zbadał, jak cząstka zostaje stworzona, zbadał, jak opuszcza emiter, styka się ze szczelinami, przechodzi przez nie, wyłania się po drugiej stronie i tak dalej, po drodze obliczając odpowiednie funkcje falowe. Na koniec, ku swej wielkiej irytacji, stwierdził, że żaden z etapów nie był wyjątkowy. Każdy element eksperymentu kwantowomechanicznego jest fizycznie równoważny wszystkim innym⁵⁰.

Był to fatalny cios dla interpretacji kopenhaskiej, ponieważ jeśli nie można wykazać, że nic nie powoduje kolapsu funkcji falowej, to dlaczego w ogóle do niego dochodzi? Bohr i Heisenberg wzruszyli ramionami, Einstein podrapał się po rozczochranej głowie, a Schrödinger zamknął drzwi swojej sypialni. Najlepiej nie pytać, co się działo w środku.

W końcu najszerzej dyskutowane (ale słabo dyskutowane) rozwiązanie problemu pomiaru przedstawił węgierski fizyk Eugene Wigner, który rozszerzył koci eksperyment Schrödingera na uczonego przeprowadzającego go na samym sobie.

Mamy kota zamkniętego wewnątrz pudła, istniejącego w superpozycji stanów życia i śmierci, a kiedy naukowiec otwiera pudło, stwierdza, że kot doznał kolapsu do jednego albo drugiego

stanu własnego. Z 50-procentowym prawdopodobieństwem w każdym z tych przypadków. Załóżmy jednak, że eksperyment jest przeprowadzany w zamkniętym pomieszczeniu, podczas gdy Wigner czeka na zewnątrz.

Jeśli interpretację kopenhaską potraktujemy poważnie, to cząstka jednocześnie zarówno wyzwala, jak i nie wyzwala detektora, zabija kota i go nie zabija. Z perspektywy Wignera jego przyjaciel naukowiec stworzyłby w ten sposób pudło i jednocześnie odkryłby martwego i żywego kota. Przyjaciel Wignera znajdowałby się w superpozycji ulgi, że kot jest żywy, ale także w stanie grozy, szukając szczotki do szorowania i szpachelki. Dopiero gdy Wigner otworzy drzwi do laboratorium i dowie się, co się dzieje, funkcja falowa jego przyjaciela dozna kolapsu⁵¹.

To przecież niedorzeczne. Przyjaciel Wignera nie mógłby być w superpozycji, ponieważ nigdy nie obserwowano, aby ludzki umysł coś takiego robił. Nie zdarza się, aby ludzie obserwowali i nie obserwowali czegoś jednocześnie. Stan świadomego czuwania jest czymś, co zawsze istnieje w stanie własnym. Dlatego też, stwierdził Wigner, to świadomość musi być czynnikiem dokonującym kolapsu funkcji falowych.

Według Wignera kiedy mówimy o pomiarze, mówimy dosłownie o odbierającym wrażenia umyśle dokonującym obserwacji, a ponieważ umysł nie może istnieć w superpozycji, obserwowane przez niego cząstki również nie mogą.

Dla jasności dodam, że Wigner nie był jakimś przeciętnym prostakiem z internetowym dyplomem studiów nad kwantowym awokado. Miał na swoim koncie Nagrodę Nobla i reputację trzeźwo myślącego fizyka. Wprowadzanie świadomości do debaty nie napawało go entuzjazmem, ale nie widział żadnej alternatywy.

Bądź ostrożny tutaj

Świadomość była i nadal jest tajemnicą, ale ponieważ każdą inną część łańcucha eksperymentalnego można opisać, kolaps funkcji

falowej musiał nastąpić wewnątrz świadomego umysłu, jedyne miejsce nie do końca przez nas zrozumianego.

Interpretacja Wignera implikuje jednak kilka surrealistycznych wniosków. Po pierwsze, oznaczałoby to, że umysł ma wpływ na cząstki, a nie odwrotnie.

Po drugie, sugerowałoby, że cały Wszechświat był w stanie superpozycji przez miliardy lat, dopóki świadome istoty nie wyewoluowały i nie zaczęły go obserwować. Na pewno w jakimś momencie na początku ludzkiej historii, kiedy populacja była mała i mniej rozprzestrzeniona, musiały być chwile, w których nikt nie obserwował Księżyca. Czy wtedy przeskakiwał on między stanem istnienia i nieistnienia? Jeśli tak, to dlaczego Ziemia nie straciła swojej stabilnej pozycji na orbicie wokół Słońca i nie odeszła w zapomnienie?

Czy coś zawsze patrzy na Księżyc, żeby to powstrzymać? Czy jest jakiś najwyższy umysł nieustannie świadomie obserwujący Wszechświat i podtrzymujący go w stanie własnym, kiedy nikt inny nie obserwuje?

Na koniec skłaniający do refleksji limeryk na temat obserwacji, rzekomo napisany przez filozofa i teologa Ronalda Knoxa:

*Był młody człowiek, który rzekł: „Bóg
Za dziwną myśl tę uznać mógł,
Że kołyszące się na wietrze
Drzewo ma rosnać tam w najlepsze,
Chociaż nikogo nie ma tu”.*

*Odpowiedź:
„Drogi Panie: Nie ma w tym nic dziwnego,
Nie brak na dziedzińcu istnienia mego.
I oto dlaczego
Rośnie tu drzewo,
Bym obserwować je mógł.
Z poważaniem, Pański Bóg”.*

Umysł magiczny

Idea Wignera dotycząca świadomości była odważna, ale oczywiście została źle zinterpretowana, szczególnie przez niektórych członków ruchu New Age. Być może nie zetknęliście się z naukami tak zwanej duchowości kwantowej, ale mogę wam je streścić.

Kiedy przyjrzyjecie się mechanice kwantowej w Internecie, oprócz prawdziwych artykułów naukowych znajdziecie prace o kryształach, ćwiczeniach, polityce lewicy, buddyzmie, hinduizmie, wegetarianizmie, jodze, samoświadomości i medytacji. Wszystko to interesujące i godne dyskusji tematy, ale nie są one w żaden znaczący sposób związane z mechaniką kwantową.

Duchowość kwantowa to coś, w co angażuje się „filozofia aspiracji”, albowiem wielu nauczycieli duchowości twierdzi, że skoro świadomość ma wpływ na rzeczywistość, to myśląc o czymś, można sprawić, że to się stanie. Parafrazuję tu trochę ich nauki, ale oni tak właśnie robią z mechaniką kwantową, myślę więc, że jest to uczciwe zagranie.

Muszę w tym miejscu jasno powiedzieć, że duchowość jest ważnym tematem, którym każdy powinien się zająć w pewnym momencie swojego życia. Rzeczywiście, wielu założycieli mechaniki kwantowej było ludźmi głęboko uduchowionymi (zwłaszcza Schrödinger i Pauli), ale musimy wyznaczyć granicę tego, co jest prawdą, a co nią nie jest.

Obserwowanie czegoś musi spowodować kolaps funkcji falowej, ale nie przesądza, do którego stanu własnego nastąpi ów kolaps. To wciąż pozostaje kwestią przypadku.

Każdy możliwy stan własny ma w równaniu Schrödingera związaną z nim „amplitudę prawdopodobieństwa”, która mówi nam o prawdopodobieństwie jego realizacji, i stan końcowy jest określany właśnie przez nie, a nie przez pomiar.

Chociaż można zaakceptować stwierdzenie, że świadomość powoduje materializację stanu własnego, to jakakolwiek wskazówka sugerująca, że możesz wpływać na sposób, w jaki ona to robi, jest oczywiście błędna. Jesteś obserwatorem rzeczywistości, ale nie masz wpływu na jej formę w sensie kwantowym. Jeśli chcecie uczynić

świat lepszym miejscem, to obawiam się, że powinniście kroczyć staromodną drogą i być dobrymi ludźmi.

Wignerowska wersja interpretacji kopenhaskiej w przeszłości była interesującym kierunkiem debaty i ładnie rozwiązywała paradoks kota, ponieważ świadomość kota jest tym, co doprowadza do kolapsu jego własną funkcję falową. Jednak uczciwie mówiąc – nadal jest to oszustwo.

Ta interpretacja mówi, że nie wiemy, jak funkcja falowa doznaje kolapsu ani czym jest świadomość, ale te dwa nieuchwytnie konstrukty jakoś współdziałają, aby stworzyć nasz świat. Po raz kolejny wpycha się tajemnicę do ciemnej jaskini i mówi nam: „Tu znajduje się odpowiedź, nie podglądać!”.

Mózg jest tajemniczy, ale tajemniczy nie oznacza „poza prawami natury”. Tajemniczy oznacza tylko, że nie znamy jeszcze szczegółów. Gdy wyjaśniamy kwantowy pomiar, nie ma powodów, aby powoływać się na zjawiska nadprzyrodzone, jest natomiast całkiem sporo powodów, aby je ignorować.

[50](#) J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, przeł. R. Bayer, Princeton University Press, Princeton 1955.

[51](#) E. Wigner, *Remarks on the Mind-Body Question*, w: I.J. Good (red.), *The Scientist Speculates*, Heinemann, Londyn 1961.

Rozdział 8

Teoria kwantów musi umrzeć

Albert Einstein atakuje teorię kwantów!

Tak brzmiał nagłówek „New York Timesa” z 4 maja 1935 roku, kiedy to największy fizyk na świecie, wówczas pięćdziesięciosześcioletni, zwrócił się przeciwko własnemu dziełu, jak Frankenstein porzucający swojego potwora. Einstein oczywiście zawsze miał wątpliwości co do mechaniki kwantowej i do 1935 roku z pomocą swojego młodego asystenta, Nathana Rosena, poświęcał cały czas na jej obalenie.

Po latach krwi, potu, łez i odrobiny pomocy ze strony rosyjskiego fizyka Borisa Podolskiego uczeni ci w końcu znaleźli w zbroi Bohra szczelinę, która od tego czasu nazywana jest paradoksem Einsteina–Podolskiego–Rosena, a w skrócie EPR⁵².

Czy kot musi umrzeć?

Równanie Schrödingera opisuje cząstkę w postaci funkcji falowej będącej formą wykazu spierwiastkowanych prawdopodobnych własności, które zmieniają się w czasie, i nie ma powodu, aby ograniczyć to do jednej cząstki.

Atom helu ma dwa elektrony zajmujące orbitale wokół swego jądra. Ponieważ funkcje falowe mogą się mieszać, funkcje falowe obu elektronów da się połączyć w jedną „dwuelektronową funkcję falową”. Jest ona bardziej skomplikowana pod względem matematycznym, ale nie stanowi to problemu, jeśli chodzi o fizykę.

Możemy pójść jeszcze dalej i dodać naszą dwuelektronową funkcję falową do funkcji falowych protonu i neutronu w jądrze, co da funkcję falową całego atomu. W praktyce wykonywanie takich obliczeń jest trudne i zazwyczaj trzeba iść na skróty (zob. dodatek 2), ale teoretycznie da się obliczyć funkcję falową czegokolwiek, co chcemy, bez względu na to, z ilu cząstek to coś się składa.

Zacznijmy od dwóch elektronów, których funkcje falowe łączymy. Każda wartość, którą obliczamy na tej podstawie, dotyczy teraz par jako pojedynczych jednostek, a nie pojedynczych elektronów.

Funkcja falowa pary elektronów może nam powiedzieć, że jeden z nich ma spin w górę, a drugi spin w dół, ale nie może określić, który z nich jest który, do czasu pomiaru. Ponieważ ich funkcje falowe są połączone, musimy opisywać zespół, a nie jego elementy.

Schrödinger określił dwie połączone w ten sposób cząstki jako „splątane”, ponieważ traktujemy ich własności jako razem splątane i nie możemy przewidzieć, która cząstka z jaką własnością wyłoni się w chwili pomiaru⁵³.

Można by się ponownie posłużyć pudłem Schrödingera w charakterze analogii, lecz tym razem zamykając w nim dwie kotki. W fizyce klasycznej obie będą różne. Mittens to ruda kotka o kudłatym futerku i długich wibrysach, natomiast Boots jest czarnulką o szorstkiej sierści i krótkich wibrysach. Z kolei w mechanice kwantowej wszystko, co możemy powiedzieć, to to, że wewnątrz pudła istnieje stan „rudego kota” i „czarnego kota”, wraz ze stanem „szorstkiej sierści”, „kudłatego futerka”, „krótkich wibrysów” i „długich wibrysów”.

Można otworzyć pudło i przekonać się, że jedna z kotek jest czarna oraz ma kudłatą sierść i krótkie wibrysy, podczas gdy druga jest teraz ruda i ma szorstką sierść oraz długie wibrysy. Nie da się stwierdzić, która z nich pierwotnie była Mittens.

Mittens już nie istnieje, ponieważ cechy, które ją definiowały, nie stanowią obecnie jedności, są zmieszane z cechami Boots. Dlatego obawiam się, że kotka musi przestać istnieć, ale może ulec hybrydyzacji przez splątanie z drugą kotką.

Dziel i mąć

Założmy, że mamy cząstkę w niezmiarzonym stanie, to znaczy jej spin jest superpozycją stanu w górę i stanu w dół jednocześnie. Teraz dzielimy oryginał na dwie siostrzane cząstki (nie martw się jak, założmy tylko, że to możliwe). Funkcja falowa oryginalnej cząstki rozpadła się, ale wszystkie jej informacje wciąż tam są. Cząstki córki mają łączne właściwości rodzica, lecz nadal nie można stwierdzić, która z nich ma które.

Używając klasycznego zdrowego rozsądku, doszlibyśmy do wniosku, że jedna z tych cząstek ma spin w górę, a druga w dół. Natomiast mechanika kwantowa mówi, że właściwości cząstek nie są określone aż do momentu pomiaru. Para ta istnieje w ogólnym stanie góra/dół i żadna z nich nie zdecydowała jeszcze, którą ma być.

Oczywiście, jeśli teraz zmierzmy jedną z tych cząstek, musi ona wybrać stan własny. Powiedzmy, że wybiera. Funkcja falowa tej pary jest nadal w stanie góra/dół, a ponieważ jedna z tych cząstek zdecydowała się mieć spin w górę, ta niezmiarzona musi w tym samym momencie przejść do stanu ze spinem w dół.

Niezmiarzona cząstka nie może pozostawać w stanie superpozycji, ponieważ, według Schrödingera, funkcja falowa jest zawsze w stanie góra/dół. Jeśli zmierzmy jedną z naszych cząstek w stanie własnym, to druga musi przyjąć odpowiedni stan własny.

Aby jednak niezmiarzona cząstka dokonała kolapsu do stanu własnego w dół, ta, która *została* zmierzona, musi jej dać znać. Między nimi musiałoby dojść do wymiany wiadomości w stylu: „Doznałam kolapsu do stanu ze spinem w górę, ty teraz doznaj kolapsu do stanu ze spinem w dół!”.

Nie miałoby znaczenia, jak daleko od siebie oddalone są te cząstki. Moglibyśmy to zrobić po przeciwnych stronach pomieszczenia lub po przeciwległych stronach planety i wynik byłby taki sam. Mechanika kwantowa przewiduje, że splątana para cząstek musi przenosić informacje pomiędzy nimi w czasie zerowym i tu właśnie powstaje paradoks EPR. Sygnał nie może biec tak szybko, ponieważ jest to sprzeczne ze szczególną teorią względności.

Względnie prosto

Mechanika kwantowa była wysiłkiem zbiorowym. Planck był menedżerem, Einstein kapitanem, Bohr bramkarzem (faktyczna pozycja, na której grał), de Broglie, Born, Sommerfeld i Pauli byli pomocnikami, Heisenberg i Schrödinger napastnikami, a Stern i Gerlach grali w obronie (choć Schrödinger zazwyczaj na linii autowej flirtował z żonami innych piłkarzy). I jeszcze coś, ich maskotką był kot. Naturalnie.

Przyznano ponad trzydzieści Nagród Nobla za rozwój mechaniki kwantowej i chociaż Einstein odegrał tu kluczową rolę, był tylko jednym z wielu. Nie zapominajmy przy tym, że szczególna teoria względności była cały czas w dużej mierze dzieckiem Einsteina.

Istnieją dwie teorie względności: ogólna teoria względności, którą Einstein opracował w 1916 roku, i ogłoszona przez niego w 1905 roku szczególna teoria względności. Będziemy rozmawiać o ogólnej teorii względności pod koniec książki, ale paradoks EPR ma związek ze szczególną teorią względności, zapoznajmy się więc z nią.

Szczególna teoria względności stwierdza dwie rzeczy:

- 1) Podczas dokonywania pomiarów żaden układ odniesienia nie jest wyróżniony.
- 2) Prędkość światła jest taka sama dla każdego, bez względu na to, w jaki sposób się porusza.

Pierwszy postulat oznacza, że nikt nie może naprawdę powiedzieć, iż jego pomiar jest obiektywny. Na przykład pewnie myślisz, że siedzisz teraz w bezruchu. Nieprawda. Okrążasz Słońce i w tym momencie jesteś już 90 kilometrów od miejsca, w którym byłeś, kiedy zacząłeś czytać to zdanie. Oznacza to, że twoja prędkość będzie różna w zależności od tego, kto ją mierzy. Z twojej perspektywy wynosi ona 0 km/s, ale pomiar z układu odniesienia związanego ze Słońcem wskazuje, że poruszasz się wokół niego

z prędkością 30 km/s. Szczególna teoria względności mówi, że obie wartości są dobre, tyle że mierzone względem różnych układów odniesienia.

Założmy, że wystrzeliłeś przed siebie strzałę z prędkością 20 m/s, a twoja przyjaciółka jedzie obok niej na rowerze z prędkością 15 m/s (pewnie już ma zdrową rękę, wcześniej bowiem wystrzeliłeś w nią kulę armatnią).

Powiedziałbyś, że strzała porusza się z prędkością 20 m/s, ale gdybyś ją zapytał, naturalnie odpowie, że strzała porusza się z prędkością 5 m/s w stosunku do niej i roweru. Obie liczby są prawdziwe, ponieważ wszystkie prędkości są jednakowo poprawne. Oprócz prędkości światła, która wynosi 299 792 458 m/s dla każdego. Wszędzie i zawsze.

Być może pamiętasz ze szkoły, że światło spowalnia, gdy przechodzi przez szkło, ale to jest trochę mylące. Fotony są absorbowane i emitowane ponownie przez atomy w szkłe, co opóźnia ogólny czas ich podróży, ale prędkość fotonów pomiędzy poszczególnymi atomami wciąż wynosi 299 792 458 m/s. Jest to stała wartość we Wszechświecie.

Jeśli świecisz latarką przed sobą, to prędkość wiązki światła wynosi 299 792 458 m/s. Twoja przyjaciółka po raz kolejny pedałuje rowerem równolegle do wiązki światła w tempie, powiedzmy, 100 m/s (jest bardzo sprawna fizycznie). Gdyby zapytać ją o to, jak szybko teraz wiązka się porusza, odpowiedziałaby również, że z prędkością 299 792 458 m/s. Tak samo jak ty. To jednak wydaje się błędne. Jeśli mknie ona obok wiązki z prędkością 100 m/s, to na pewno powinna zmierzyć jej prędkość pomniejszoną, tak samo, jak to zrobiła w przypadku strzały. Szczególna teoria względności mówi co innego. Prędkość światła jest taka sama dla wszystkich.

Nawet gdyby twoja przyjaciółka pędziła z prędkością 99 procent prędkości światła, jej prędkościomierz nadal mierzyłby wiązkę z prędkością 299 792 458 m/s. Oczekiwalibyście, że otrzyma inny wynik, ale za każdym razem jest on taki sam.

Założmy, że koleżanka jedzie w twoim kierunku, a promień leci ku niej. Czy nie powinna mieć odczucia większej prędkości światła,

ponieważ zbliża się ono do niej? Einstein mówi: Nie. Dla niej wiązka porusza się z taką samą prędkością.

Istnieje prosty sposób na udowodnienie, że prędkość światła jest zawsze taka sama dla każdego obserwatora (zob. dodatek 3), ale jeśli to uwzględnimy, konsekwencje są naprawdę dziwne.

Skoro dwie osoby poruszają się z różnymi prędkościami, ale mierzą światło z tą samą prędkością, to coś pomiędzy ich układami odniesienia musiało ulec zniekształceniu. Jeśli mierzą dwa różne scenariusze, ale otrzymują ten sam wynik, to coś jest nie tak i winowajcą, powiedział Einstein, jest sam czas.

Jeśli przyjmiemy te dwa postulaty szczególnej teorii względności, to czas musi płynąć w różnym tempie dla dwóch poruszających się obserwatorów. Gdy ktoś podróżuje szybciej, jego zegar zwalnia, a w rezultacie promień światła wydaje się równie szybki, ponieważ wolniej pokonuje on czas. Czas płynie wolniej dla twojej przyjaciółki na rowerze, a więc kiedy mierzy ona prędkość mijającego ją promienia, wydaje się on tak samo szybki.

Nie wyczuwałaby jednak tej dylatacji czasowej. Gdyby patrzyła na swój zegarek, nie zauważyłaby, żeby druga wskazówka poruszała się odmiennie. Wszystkie cząstki w jej mózgu również doświadczają czasu upływającego w rozciągniętym tempie. Z jej perspektywy to ty jesteś tym, którego linia czasu jest zakrzywiona. Ona widzi ciebie jak w filmie wyświetlanym w przyspieszonym tempie do przodu i żadne z was nie może powiedzieć, że jego czas jest „poprawny”, ponieważ wszystkie pomiary są jednakowo poprawne.

Brzmi jak zmyślane, prawda? Otóż w 1971 roku Richard Keating i Joseph Hafele wystawili na próbę szczególną teorię względności, synchronizując dwa zegary atomowe i rozdzielając je z różnymi prędkościami. Jeden został umieszczony na pokładzie komercyjnego samolotu odrzutowego (z biletem wystawionym na pana Zegara) i obleciał świat osiem razy, podczas gdy drugi pozostał na ziemi.

Kiedy samolot przelatywał nad głowami Hafele’a i Keatinga, porównali oni odczyt pana Zegara z odczytem jego brata i stwierdzili, że pan Zegar był opóźniony dokładnie o tyle czasu, ile przewidział Einstein.

Jest to z pewnością niewielki efekt (pan Zegar stracił tylko kilka nanosekund), ale gdy poruszasz się szybciej, naprawdę starzejesz się odrobinę wolniej. Do pewnego momentu.

Efekt dylatacji czasu nie może trwać wiecznie, ponieważ istnieje najwolniejszy czas, jaki może upłynąć – może się on całkowicie zatrzymać. Zgadnij, jaka prędkość powoduje, że tak się dzieje? To 299 792 458 m/s. Prędkość światła jest tak naprawdę prędkością, z jaką zatrzymuje się czas, jest to więc taka wartość, której nie da się przekroczyć.

Kiedy rozważamy prędkość światła i mówimy, że jest to największa prędkość, z jaką można się poruszać, nie wyrażamy tego zbyt poprawnie. Lepiej byłoby powiedzieć, że im szybciej się poruszasz, tym bardziej czas zwalnia swój bieg, aż do chwili kiedy osiągasz prędkość 299 792 458 m/s i w tym momencie czas dla ciebie się zatrzymuje.

Światło samo w sobie nie ma nic szczególnego; szczególny jest natomiast fakt, że Wszechświat ma maksymalną prędkość i światło właśnie z nią porusza. Dylatacja czasu wyznacza granicę prędkości, z jaką wszystko może się poruszać, co uniemożliwia kwantowe splątanie.

W szczególnej teorii względności pomiędzy dwoma cząstkami nic nie może poruszać się szybciej niż w tempie wynoszącym 299 792 458 m/s, ale informacja pomiędzy splątanymi cząstkami musi właśnie to robić. Cząstka, która zdecyduje się na wybór stanu własnego spinu, musi wysłać do swojego partnera komunikat podróżujący szybciej niż światło, informując go, aby doprowadził do kolapsu swej funkcji falowej. Takie zjawisko Einstein nazwał „upiornym działaniem na odległość”.

Upiorny kot

Einstein, Podolsky i Rosen zwrócili uwagę na tę sprzeczność między mechaniką kwantową a szczególną teorią względności i zaproponowali także rozwiązanie. Mechanika kwantowa jest wadliwa, a Einstein ma rację. Co za niespodzianka.

Splątane cząstki muszą z wyprzedzeniem podjąć decyzję, w którą stronę się obracać, gdy się je zmierzy. Dochodzą do zgody, gdy są generowane w splątaczu (nazwa, którą wymyśliłem dla urządzenia tworzącego pary splątane), a następnie podążają po swoim ustalonym wcześniej torze lotu.

Prowadzą rozmowę, która mniej więcej przebiega tak:

Elektron: Hej stary, jeśli natkniemy się na bramkę spinu Sterna–Gerlacha, to ty powinieneś lecieć w górę, a ja w dół, OK?

Drugi Elektron: Czekaj, dlaczego muszę lecieć w górę?

Elektron: (Westchnienie) Czy zawsze musisz być taki?

Drugi Elektron: Jaki?

Elektron: Trudny.

Drugi Elektron: Nie jestem trudny, bracie, po prostu myślę, że powinniśmy sprawiedliwie decydować o stanie naszych spinów.

Właśnie tak sformułował to Einstein.

Einstein pojmował splątanie w ten sposób, że cząstki nie decydują w momencie pomiaru, czym będą, lecz mają z góry zadany wynik, który odkrywamy. Superpozycje naprawdę nie istnieją. To tylko brak wiedzy.

Przypuśćmy, że wkładamy do pudeł czerwonego i zielonego kota i wysyłamy na przeciwległe krańce Układu Słonecznego. Jeśli otworzymy jedno z pudeł w punkcie docelowym i znajdziemy w nim czerwonego kota, to tym samym natychmiast wiemy, co zawiera drugie pudło. Informacja „zielony kot” metaforycznie przebiegła Wszechświat w naszym kierunku, ale nie ma tu żadnego naruszenia względności, ponieważ dosłownie nic nie musi pokonywać tej odległości.

Kwantowy pogląd jest taki, że koty nie wybrały jeszcze swoich własności i zdecydują się na nie przypadkowo, telepatycznie, szybciej od światła, komunikując się ze sobą w punkcie pomiaru. Einstein

uważał, że własności kota są z nim zawsze, po prostu nie możemy ich zobaczyć dopóty, dopóki nie dokonamy pomiaru.

Po opublikowaniu tego artykułu Einstein i Rosen kontynuowali ścisłą współpracę i cieszyli się trwałą przyjaźnią. Podolsky natomiast popadł w zapomnienie, choć niektórzy historycy twierdzili, że w czasie zimnej wojny pracował jako szpieg dla KGB, działając pod ciekawym pseudonimem: Quantum⁵⁴.

Aha, tak przy okazji. Wiem, że każda analogia w mechanice kwantowej, jak się wydaje, ma związek z otwieraniem lub zamykaniem jakiegoś pudła. Następnym razem użyję innej analogii. Obiecuję.

Einsteinie, to dla ciebie bije dzwon

Teoria Einsteina była gotowa zasłużyć na laurach, ale pojawił się uczoney z Irlandii Północnej, John Stewart Bell, który w latach sześćdziesiątych XX wieku poświęcił się mechanice. Bell przez całe życie miał pasję naukową, nie lubił pompatości i poświęcał dużo czasu wyjaśnianiu fizyki szerokim kręgom społeczeństwa, a w trakcie próby wytłumaczenia paradoksu EPR wymyślił coś ciekawego.

Twierdzenie Bella, pomysł, który doprowadził go do nominacji do Nagrody Nobla⁵⁵, było zmieniającym zasady gry sposobem na eksperymentalne sprawdzenie paradoksu EPR. Niestety, Bell nie otrzymał Nagrody Nobla, ponieważ zmarł, zanim komisja podjęła decyzję, a nagroda nigdy nie jest przyznawana pośmiertnie. Jego twierdzenie jednak nadal żyje.

Splećmy stany dwóch cząstek, które nazwiemy Alicją i Bobem, i wyślijmy je obie oddzielnie przez bramki Sterna–Gerlacha stojące po przeciwległych stronach pomieszczenia. Możemy nasze bramki ustawić do każdego pomiaru pionowo, poziomo lub po przekątnej, a na razie przyjmijmy, że Einstein miał rację: obie cząstki na wstępie ustalają, jaki spin przyjmą po pomiarze. Pionowe bramki dają wyniki spinu góra/dół, poziome bramki dają wyniki spinu lewo/prawo,

a bramki ukośne dają... hmm... wyniki północny wschód/południowy zachód?

Poziome i pionowe spiny cząstki są niezależne, ale te po przekątnej już nie. Pionowy lub poziomy kierunek spinu wpływa na to, w którą stronę poleci cząstka, gdy zmierzy ją bramka ukośna.

Pomyślcie o tym w ten sposób. Jeśli ustawimy obie nasze bramki pionowo, to gdy Alicja ma spin w górę, istnieje stuprocentowa szansa, że Bob będzie miał spin skierowany w dół. Jeśli jednak ustawimy bramkę Boba poziomo, to nie wiemy, jaki będzie wynik. Alicja będzie miała spin w górę, ale jest 50 procent prawdopodobieństwa, że Bob będzie miał spin skierowany w lewo lub w prawo.

Jeśli zaś detektor Boba jest ustawiony pod kątem 45 stopni, to znaczy, że jest w połowie drogi między tymi dwoma skrajnościami, co oznacza, że możemy przewidzieć jego spin z prawdopodobieństwem w połowie między 50 a 100 procent. Możemy przewidzieć, który z wyników ukośnych wybierze Bob przez 75 procent czasu.

Jeśli spin cząstki jest skierowany pionowo w górę, to jej spin po przekątnej będzie prawdopodobnie miał wartość 75 procent na północny wschód (tzn. skierowany lekko ku górze), a jeśli jest skierowany w dół, jej pomiar po przekątnej prawdopodobnie wskaże 75 procent na południowy zachód (skierowany lekko ku dołowi).

Według Einsteina zarówno Alicja, jak i Bob wybrali już, czy mają spiny skierowane w górę, czy w dół, co, jak wskazał Bell, oznacza, że mają niewielkie preferencje przy wyborze lotu po jednej przekątnej w porównaniu z lotem po drugiej.

Nie możemy mierzyć ukośnego i pionowego spinu elektronu w tym samym czasie (bądź przekłęty, Heisenbergu), ale *możemy* zmierzyć ich splątanego partnera. Jeśli zmierzmy spin pionowy Alicji i stwierdzimy, że jest on zwrócony w górę, to Bob powinien mieć spin przeciwny, ustalony wcześniej (w dół), co będzie miało wpływ na to, jak poleci po przekątnej. Jeśli Alicja ma spin w górę, to Bob prawdopodobnie będzie miał spin skierowany na południowy zachód w bramce ukośnej.

Teraz powiedzmy, że powtarzamy ten eksperyment sto razy. Jeśli ustawimy bramkę Alicji pionowo, to przez 75 procent czasu, kiedy ona będzie miała spin w górę, Bob będzie miał spin skierowany na południowy zachód i na odwrót.

Natomiast jeśli Bob i Alicja naprawdę nie podjęli decyzji aż do momentu pomiaru, wyniki eksperymentu powinny dać inną liczbę niż 75 procent. Powinno to wyjaśnić, czy superpozycje naprawdę istnieją.

W 1982 roku francuskiemu fizykowi Alainowi Aspectowi udało się zbudować prawdziwie działający splątacz według specyfikacji Bella i przeprowadzić eksperyment EPR z nadzieją na potwierdzenie zastrzeżeń Einsteina i odrzucenie interpretacji kopenhaskiej Bohra na zawsze⁵⁶.

Bell miał nadzieję, że ujawni to 75 procent zgodności dla Alicji i Boba, dowodząc, że cząstki miały ukryte własności nabyte wcześniej. Tymczasem liczby te były inne. Zupełnie inne. Nie zaobserwowano 75 procent Bella, co oznacza, że klasyczne wyjaśnienie przez Einsteina paradoksu EPR jest błędne.

Cząstki nie decydują z góry, co z nimi ma być, gdy są mierzone. W jakiś sposób naprawdę decydują o swoim stanie w punkcie pomiaru, nawet jeśli są oddzielone odległościami zabronionymi przez szczególną teorię względności. Dziwność kwantowa zwyciężyła.

Niekoniecznie dowodzi to, że cząstki wysyłają wiadomości szybciej niż światło, ale szczerze mówiąc, nikt nie jest pewien, czego to *dowodzi*.

Jednym z wyjaśnień jest coś, co między cząstkami porusza się szybciej niż światło. Innym – że cząstki są połączone maleńkimi tunelami czasoprzestrzennymi przekraczającymi wymiary naszego Wszechświata. Wedle kolejnej hipotezy splątane cząstki nie są w ogóle rozdzielone i istnieje iluzja przestrzeni, która sprawia, że my, ludzie, myślimy, iż są one rozdzielone, kiedy naprawdę są razem.

Nie możemy tego zrozumieć, ale w jakiś sposób dwie splątane cząstki komunikują się, niezależnie od tego, jak bardzo są od siebie oddalone. To, co zrobicie z cząstką na Ziemi, natychmiast wpłynie na jej bliźniaka na Księżycu, z bezzwłocznym przekazem wiadomości pomiędzy nimi. Wasze domysły dotyczące tego, jak to się dzieje, są

tak samo dobre, jak propozycje innych osób. A moim zdaniem to robota chochlików.

[52](#) A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen, *Can Quantum Mechanical Description of Reality be Considered Complete?*, „Physical Review” 1935, t. 47.

[53](#) E. Schrödinger, *Discussion of Probability Relations Between Separated Systems*, „Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society” 1935, t. 31, nr 4, s. 555–563.

[54](#) J.E. Haynes, H. Klehr, A. Vassiliev, *Spies: The Rise and Fall of the KGB in America*, Yale University Press, New Haven–Londyn 2009.

[55](#) A. Whitaker, *John Stewart Bell and Twentieth-Century Physics*, Oxford University Press, Oksford 2016.

[56](#) A. Aspect, P. Grainger i G. Roger, *Experimental Realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities*, „Physical Review Letters” 1982, t. 49, nr 2, s. 91–94.

Rozdział 9

Teleportacja, wehikuły czasu i wirowanie

Instant Instagram

Jeśli mamy dwa elektrony, które splączemy na Ziemi i wyślemy na przeciwległe krańce kosmosu, łączy splątania pozwala im na natychmiastową komunikację. Czy moglibyśmy użyć tego do wysłania sygnałów szybszych niż światło? Niestety, wydaje się, że nie.

Założmy, że mamy dwie splątane cząstki o nieokreślonych spinach i zamykamy je wewnątrz dwóch pudeł... chwilę, nie, obiecałem, że będziemy unikać pudeł w następnych analogiach... zamykamy je wewnątrz dwóch kurczaków. Jeden kurczak zostaje wysłany na Marsa, a drugi na Neptuna.

Kiedy nasza marsjańska kolonistka otwiera swojego kurczaka i zagląda do środka, cząsteczka przyjmuje spin „w górę”. To interesujące, myśli. Od razu wie, że druga eksperymentatorka na Neptunie ma wewnątrz kurczaka cząstkę ze spinem w dół. Jednak nie ma innego sposobu, aby powiedzieć o tym swojej przyjaciółce, niż wysłanie wiadomości zwykłymi kanałami.

Nie ma możliwości wysłania sygnału za pośrednictwem łączy splątania, ponieważ jedyne, co ono robi, to komunikuje, który stan własny przyjęła cząstka. Nie mamy nad tym żadnej kontroli (jest to zdarzenie losowe), nie mamy więc kontroli nad tym, jakie komunikaty są wysyłane między splątanymi cząstkami.

Gdyby nasza eksperymentatorka *mogła* w jakiś sposób przekonać cząstkę do przyjęcia spinu w górę lub w dół, wykorzystałaby serię kurczaków do zakodowania informacji binarnych, które jej przyjaciółka odszyfrowałaby sobie na Neptunie, ale nie jest to możliwe.

Nie można wpływać na superpozycję bez jej mierzenia, a mierząc ją, dokonuje się jej kolapsu, co niweczy cel. Jediną informacją, którą można by kiedykolwiek uzyskać dzięki splątaniu, byłby wynik z dziennika pomiarów innego naukowca. Szybsza niż światło komunikacja nie jest możliwa. Ale teleportacja...

Teleportuj mnie

4 lipca 2017 roku grupa fizyków pracujących w Chinach opublikowała swój nowy rekord świata – dokonali mianowicie teleportacji na największą dotąd odległość⁵⁷. Poprzedni rekord został ustanowiony w 2012 roku przez zespół naukowców, który między górami na Wyspach Kanaryjskich⁵⁸ teleportował coś na dystans 143 kilometrów, ale ten nowy rekord pobił poprzedni dziesięciokrotnie.

Zespół, prowadzony przez Pan Jianwei, dokonał teleportacji kwantowej z laboratorium w Tybecie na satelitę Micius, który orbituje na wysokości 1400 kilometrów nad Ziemią. Toż to jest natychmiastowy środek transportu z Ziemi w kosmos i tkwiącego we mnie fana serialu *Star Trek* zaczynają przechodzić ciarki.

Mechanizm teleportacji kwantowej został nakreślony w 1993 roku przez Ashera Peresa, Williama Woottersa i Charlesa Bennetta podczas pracy na uniwersytecie montreal skim⁵⁹. Wiemy już ze szczególnej teorii względności, że cząstki nie mogą poruszać się szybciej niż światło, ale dzięki splątaniu informacja o stanie cząsteczki może cichcem obejść ten problem.

Weźmy jeszcze raz pod uwagę Alicję i Boba. Po stworzeniu przez splątacza oboje są wysyłani w różne miejsca, pomiędzy którymi chcemy dokonać teleportacji. Bob trafia na satelitę, a Alicja jest trzymana w laboratorium na Ziemi. Nie znamy jeszcze żadnej

z indywidualnych własności Alicji ani Boba (to właśnie powoduje ich splątanie), ale znamy ich stan wspólny.

Teraz wprowadzamy trzecią część, tę, którą chcemy teleportować. Nazwiemy ją Kasią. Kasia jest w znanym nam stanie, ale jeśli doprowadzimy ją do kontaktu z Alicją, możemy splątać je obie do stanu superpozycji.

Musimy się upewnić, czy przypadkowo nie zmierzymy Alicji w tym procesie, ponieważ spowoduje to kolaps splątania, który ma ona z Bobem, ale jeśli będziemy ostrożni (używając urządzeń zwanych CNOT i bramek Hadamarda), możemy sprawić, że Kasia porzuci swój stan własny i splącze się z Alicją.

Otwieramy pokój, w którym przebywa Alicja, ale nie patrzymy tam, gdy przytrzymujemy drzwi, wpuszczając Kasię do środka. Stan Kasi i Alicji jest teraz superpozycją, straciliśmy więc informacje o każdej z nich, ale początkowa tożsamość Kasi jest gdzieś tam, dzielona między nimi obiema.

Ponieważ splątaliśmy Alicję z Kasią, nie niszcząc początkowego splątania z Bobem, informacja Kasi jest teraz dzielona także z nim, chociaż znajduje się on w przestrzeni kosmicznej. Tym samym stworzyliśmy scenariusz potrójnego splątania, który Schrödinger bez wątplenia by zaakceptował.

Możemy dokonać pomiaru, który da nam *pewne*, ale nie wszystkie informacje o Kasi i Alicji. Reszta z nich pozostanie splątana z Bobem.

Założmy, że dokonujemy pomiaru Kasi i Alicji, który ujawni nam kolor ich włosów, ale nie oczu. Informacja o kolorze włosów doznaje kolapsu do stanu własnego, ale kolor oczu jest nadal w superpozycji. Gdybyśmy teraz przekazali wiadomość radiową do satelity, na którym znajduje się Bob, i powiedzieli załodze, aby dokonała pomiaru koloru jego oczu, mielibyśmy duże szanse na stwierdzenie, że Bob ma kolor oczu Kasi.

Sama Kasia nie została fizycznie przeniesiona przez przestrzeń kosmiczną, ale część jej tożsamości – tak. Wygląda to, jakby Bob był czystym płótnem, a obraz Kasi został zerwany i przywarł do niego.

Peres i Wootters chcieli nazwać to zjawisko kwantową teleferezą, ale Bennett miał nalegać, że „teleportacja” brzmi lepiej⁶⁰, i się nie mylił.

Jest tu jednak kilka ograniczeń, co do których powinniśmy mieć jasność. Po pierwsze, Kasia będzie utrzymywać swoje własności dopóty, dopóki jej stan nie dozna superpozycji ze stanem Alicji. Oznacza to, że nie możemy zamienić Boba w Kasię i nadal mieć oryginalnej Kasi. Jeśli chcemy przenieść własności Kasi, musimy je od niej odłączyć. Nazywa się to „zasadą nieklonowania”, która stwierdza, że informacje kwantowe mogą być przenoszone, ale nigdy powielane.

Po drugie, nie możemy przekazywać informacji bez umieszczonej na drugim końcu aparatury pomiarowej, która ją wykryje. Po dokonaniu pomiaru na Kasi i Alicji nadal musimy wysłać regularny sygnał; osobie badającej częśćkę zwaną Bob sygnał będzie mówił, którą własność Boba należy zmierzyć. Jeśli tą informacją, która została wysłana (a my nie mamy nad tym kontroli), jest kolor oczu, to nie jest dobrym pomysłem pomiar koloru włosów Boba, który już przeszedł do stanu własnego.

Oczywiście w prawdziwym procesie teleportacji nie mierzy się czegoś takiego jak kolor oczu, lecz stan spinu i energii, ale ponieważ te własności identyfikują częśćki, równie dobrze więc mogą to być takie same cechy.

Jeśli przeprowadzicie takie teleportacje wystarczająco wiele razy, to teoretycznie zdołacie przenieść każdą własność częśćki, jedna po drugiej, na satelitę. I jeśli częśćka na satelicie stanie się identyczna z tą, z którą zaczęliście na Ziemi, to skutecznie ją teleportowaliście.

Czy wspominałem, że mechanika kwantowa podróżuje w czasie?

Tak jakby. Eksperyment, o którym mowa, nazywany jest „gumką kwantową o opóźnionym wyborze” i należy do zabronionej części biblioteki Hogwartu ze względu na deprawowanie umysłów niewinnych młodych fizyków.

Stwórzcie splątaną parę cząstek i odeślijcie jedną z nich (Alicję) do prostego aparatu podwójnej szczeliny z ekranem po drugiej stronie. Następnie, osobno, wyślijcie Boba do detektora cząstek, który, jeśli

jest włączony, dokona kolapsu jego funkcji falowej, ale jeśli jest wyłączony, pozostawi go w stanie superpozycji.

Ponieważ Bob jest splątany z Alicją, to, co stanie się z nim w detektorze, natychmiast wpłynie na to, co się stanie z nią w podwójnej szczelinie. Jeśli detektor zostanie włączony, gdy Bob zbliży się do niego, jego stan dozna kolapsu, zmuszając stan Alicji do zrobienia tego samego, ona zaś przejdzie tylko przez jedną z tych szczelin, jak klasyczna cząstka. Jeśli jednak detektor jest wyłączony, to Bob będzie się zachowywał jak funkcja falowa w stanie superpozycji, a Alicja przejdzie przez obie szczeliny jednocześnie również w stanie superpozycji, aż trafi na ekran gdzieś w jeden z prążków zebry.

Gdy wykonamy to kilkaset razy, zakończy się idealnym dopasowaniem. Jeśli detektor Boba jest włączony przez 15 procent czasu, to 15 procent cząstek Alicji uderza w ekran w sposób klasyczny, podczas gdy pozostałe 85 procent kończy jako „wzorec prążków zebry”.

Jeśli umieścić podwójną szczelinę obok miejsca, w którym Alicja jest generowana w splątaczu (słowo, które zaczyna brzmieć jak określenie budzącego grozę łotra z *X-Men*), to Alicja przejdzie przez nią i zmuszona będzie uzyskać własności cząstki lub fali, w zależności od tego, czy Bob zostanie wykryty, czy nie. Ale co się stanie, jeśli detektor Boba jest oddalony o kilometr?

Kiedy Alicja dociera do podwójnej szczeliny, Bob jeszcze nie trafił do detektora i nie odkrył, czy jest on włączony, czy nie. Jeśli Bob *zostaje* zmierzony, ona musi przelecieć przez podwójną szczelinę jako cząstka, jeśli zaś *nie zostaje* zmierzony, to przelatuje jako fala. Jednak los Boba nie jest jeszcze przesądzony, Alicja więc nie wie, czy detektor jest włączony, czy nie. Co zatem robi?

Opóźniliśmy decyzję Alicji dotyczącą tego, czy ma dokonać kolapsu, czy nie, poza chwilę, w której musiała to zrobić, zatem skutek wymuszono, zanim zaszła przyczyna. Z pewnością taka maszyna jak ta to szaleństwo? Otóż w 1999 roku Yoon-Ho Kim zbudował taką. I Alicja miała rację za każdym razem⁶¹. Na piłkarskiego ducha Nielsa Bohra, jak to możliwe?

Jeśli podczas 42 procent eksperymentów eksperymentatorzy włączali detektor do pomiaru Boba, to 42 procent cząstek zwanych Alicją przechodziło przez szczelinę jak cząstki. Jeśli detektor wykrywający Boba był przez 89 procent czasu włączony, to 89 procent cząstek zwanych Alicją przechodzi przez szczelinę. Bez względu na to, jak często był włączony detektor, Alicja w jakiś sposób dokonywała właściwego wyboru.

To tak, jakby Alicja widziała przyszłość i wiedziała, co Bob będzie jej komunikować przez ich łącznie splątania. Informacje o splątaniu mogą najwyraźniej podróżować szybciej niż natychmiast. Czy możemy zatem wysłać wiadomość z przyszłości w przeszłość?

Powiedzmy, że w naszym eksperymencie wystrzelimy trzy pary splątanych cząstek i obserwujemy elektrony cząstki zwanej Alicją. Tworzymy trajektorię Boba tak długą, że Bob nie przeleci jej przez dwadzieścia cztery godziny. Jeden z naukowców za dwadzieścia cztery godziny pójdzie do detektora Boba, by wyłączyć go i włączyć w określony sposób, pozwalający opisać pogodę. WŁĄCZONY–WYŁĄCZONY–WŁĄCZONY oznacza słoneczną pogodę, natomiast WYŁĄCZONY–WŁĄCZONY–WYŁĄCZONY – deszczową.

Cząstka Alicja uderzy w ekran w odpowiedni sposób, informując nas o kolejności, w jakiej eksperymentator w przyszłości będzie ustawiał detektor Boba. Wówczas udałoby się nam wysłać wiadomość w czasie wstecz.

Niestety, jest jeszcze jeden haczyk. Mierzając pojedynczą cząstkę Alicję, nie możemy stwierdzić, czy przeszła przez obie szczeliny, czy przez jedną. Każda cząstka trafia na ekran w przypadkowym miejscu, co może wynikać z zachowania klasycznego lub kwantowego. Efekt kwantowych prążków obserwujemy tylko wtedy, gdy mierzymy tysiące par Alicja/Bob i porównujemy wyniki wyrażone w procentach.

Oznacza to, że efekt podróżowania w czasie jest obserwowany tylko pod koniec eksperymentu, a nie w jego trakcie. Efekty kwantowe widzimy jedynie wtedy, gdy wymazujemy naszą wiedzę o tym, co robi Alicja podczas każdej indywidualnej próby. Stąd nazwa: gumka kwantowa o opóźnionym wyborze.

To zjawisko, czymkolwiek jest, zachodzi wewnątrz metaforycznie zamkniętego pu... kurczaka, a my widzimy je dopiero po fakcie.

Szczerze mówiąc, mechanika kwantowa to zalotna żartownisia.

Świat nie powinien mieć sensu

W interpretacji kopenhaskiej przyjmuje się, że efekty kwantowe dominują aż do punktu zwanego „odcięciem Heisenberga”, po którym władzę obejmuje już fizyka klasyczna. Wszystko, co jest mniejsze od odcięcia Heisenberga, będzie podlegać równaniu Schrödingera, a wszystko, co większe, będzie zgodne z równaniem Newtona. Tak fizyka mówi w naszym imieniu, że „nie mamy pojęcia, co się dzieje”.

Problem w tym, że dzięki splątaniu cięcie Heisenberga nie może naprawdę istnieć. Jeśli stosujesz mechanikę kwantową do pojedynczej cząstki, to możesz ją łatwo stosować do dwóch, trzech, czterech lub dowolnej ich liczby. Splątania mogą łączyć razem dowolną liczbę cząstek, zatem powinno być możliwe stworzenie funkcji falowych Schrödingera dla ludzi, dla całych populacji i nawet planet.

Powinniśmy cały czas obserwować kwantowe szaleństwo, ale oczywiście nic takiego nie dostrzegamy. Było to jedno z pięciu wielkich pytań, na które natknęliśmy się wcześniej, i jest ono jednym z tych, w odniesieniu do których w ostatnich latach dokonaliśmy niezłego postępu.

Rozważmy pomiar na splątanej cząstce, który określa stan spinu w górę. Ponieważ jej splątany partner natychmiast przechodzi do stanu ze spinem w dół, obie już nie są ze sobą związane. Splątanie zostaje przerwane, gdyż nie rządzi nimi ta sama funkcja falowa, i możemy je opisać niezależnymi stanami własnymi.

Teraz rozważmy sam akt pomiaru. Gdy mierzymy cząstkę, staje się ona splątana z cząstką w naszym detektorze, zrywając połączenia z każdą cząstką, z którą była wcześniej splątana.

Pomiar jednej cząstki ze splątanej pary jest zamianą jednego splątania na drugie, co oznacza, że pomiar czegoś jest tym samym, co splątaniem się z tym. Nawet jeśli jest to pomiar pojedynczej cząstki.

Jeśli przed pomiarem pojedyncza cząstka znajduje się w superpozycji stanów spinu w górę/w dół, to faktycznie jest ona splątana sama z sobą. Jej dwa możliwe wyniki połączone są tą samą funkcją falową i kiedy dokonujemy pomiaru, zrywamy to samoistne splątanie.

Kot Schrödingera jest ocalony/martwy

Gdy rzucamy monetą, mamy na myśli dwa rezultaty: orzeł lub reszka. Istnieje jednak trzecia możliwość. Moneta mogłaby wylądować na boku, wirując w połowie drogi między orłem i reszką.

Teraz wyobraźmy sobie, że powoli zbliżamy palec do wirującej monety. Gdy tylko jej dotkniemy, przewróci się na jeden lub drugi bok, kończąc taniec niepewności. Moneta przedstawia cząstkę z dwoma możliwymi stanami, wirowanie oznacza superpozycję, a nasz palec to przyrząd pomiarowy dokonujący kolapsu funkcji falowej.

Na razie Kopenhaga górą. Z wyjątkiem tego, że analogia ma wadę. Palec, który dotyka monety, nie jest obiektem innego typu. To detektor wykonany z cząstek, związanych tymi samymi prawami kwantowymi co moneta. Tak więc zamiast palca powinniśmy sobie wyobrazić detektor w postaci nowej monety, która wirując na stole, przesuwa się w kierunku interesującego nas obiektu. Zarówno detektor, jak i cząstka znajdują się w superpozycji, a kiedy się spotykają, uderzą w siebie i oba obiekty doznają kolapsu do stanu własnego.

Jeśli jednak uzyskamy odpowiednią prędkość obrotową, monety mogą się teoretycznie zazębić i pozostać razem w stanie superpozycji jak wirujący partnerzy w tańcu – wirując niczym splątana para. W świecie prawdziwych monet nie zdarza się to zbyt często, ale wśród cząstek – całkiem łatwo, pod warunkiem że ich funkcje falowe są odpowiednio dobrane.

Trudno sobie wyobrazić, jak można by było wprawić sto monet w wirowanie razem, w kręcenie się w jednym wielkim splątaniu. Nawet gdyby się to udało, byłby to układ bardzo wrażliwy na bodźce

zewnątrzne. Pojedyncza moneta w tej mieszance lub moneta wprowadzona do systemu z zewnątrz mogłaby doprowadzić cały układ do kolapsu. Im więcej cząstek wchodzi w interakcję, tym trudniej utrzymać je w superpozycji.

Nie ma określonej liczby cząstek, które nagle sprawiają, że układ staje się klasyczny. Tylko klasyczne obiekty mają tak wiele cząstek, że niemożliwe staje się ustawienie ich wszystkich w fazie w tym samym czasie. Świat klasyczny powstaje na skutek tego, że superpozycje są niestabilne, ale nie ma takiego prawa, które uniemożliwia dużemu obiektowi znalezienie się w stanie superpozycji.

Kot może zawierać biliony bilionów cząstek i jeśli każda z nich splącze się w idealnej synchronizacji, superpozycje mogą dotyczyć kota jako całości. Jednak jest to mało prawdopodobne, ponieważ pojedyncza cząsteczka powietrza, dotykając kota, dokonałaby kolapsu takiej całości.

Schrödinger dowodził, że kot nie może być żywy i martwy jednocześnie, ponieważ jest to metafizycznie niemożliwe. Miał rację, ale przyczyny były zupełnie inne. Radioaktywna cząsteczka w pudle może być w stanie superpozycji, ale gdy tylko stanie się splątana z czymś większym, to z coraz mniejszym prawdopodobieństwem będzie utrzymywać stan superpozycji.

Gdybyśmy jednak w jakiś sposób zdołali sprawić, że każda cząstka wewnątrz kota jest idealnie koherentna i splątana, superpozycja martwy/żywy rozpadłaby się na skutek oddziaływania z samym pudłem. Jedynym sposobem utrzymania kota żywego i martwego jednocześnie byłoby odizolowanie go od otoczenia. Tak właśnie zrobił fizyk Aaron O'Connell w sierpniu 2014 roku.

Makroskopowy świat kwantowy

W eksperymencie O'Connella „kotem” w rzeczywistości był kawałek metalu w kształcie trampoliny o szerokości sześćdziesięciu tysięcznych metra, mniej więcej rozmiaru ludzkiego włosa. Był zawieszony nad miniaturowym basenem umieszczonym w pudełku

i schłodzony do kilku stopni powyżej zera absolutnego, aby cząstki, z których się składał, oddziaływały ze sobą w fazie. Każde przypadkowe drganie w materiale dokonuje kolapsu wszystkiego, ale jeśli wszystkie cząstki są schłodzone, cały obiekt zachowuje się jak jedna wielka cząstka.

Metal w kształcie trampoliny został następnie podłączony do obwodu na zewnątrz pudełka, co pozwalało O'Connellowi mierzyć poziom przepływającego prądu, dzięki czemu mógł obserwować jego zachowanie bez bezpośredniego otwierania pudełka. W tym stanie w bardzo niskich temperaturach O'Connell włączył maszynę i usunął całe powietrze, aby zapobiec wystąpieniu splątań. I pojawiła się kwantowa magia.

Trampolina wpadła w drgania, zarówno delikatne, jak i energiczne. Cząstki zaczęły się poruszać jednocześnie silnie i słabo, co oznacza, że co kilka nanosekund atomy znajdowały się w dwóch położeniach jednocześnie, w pobliżu pozycji równowagi i daleko od niej. O'Connell zbudował pierwszą na świecie maszynę kwantową.

W maju 2018 roku Michael Vanner zbadał to w większej skali, budując bęben kwantowy, który mógł być jednocześnie uderzony i nieuderzony. W jego eksperymencie na trajektorii fotonów umieszczono membranę o szerokości 1,7 milimetra (o grubości ziarna piasku) i dano fotonom wybór – uderzyć w nią albo nie. W stanie superpozycji nastąpią oba te zjawiska, co oznacza, że bęben będzie drgał, ponieważ zaabsorbuje pęd fotonów, albo pozostanie nietknięty, ponieważ fotony wybiorą mniej rytmiczną trajektorię.

Wibracje są zbyt małe, aby mogło je zobaczyć ludzkie oko – tylko kilka fotonów uderza w bęben raz na sekundę – ale czuły aparat Vannera wykrył fotony lecące obiema trajektoriami, co oznacza, że bęben drgał i pozostawał nieruchomy. Eksperyment Vannera był jeszcze bardziej niezwykły, ponieważ przeprowadzono go w temperaturze pokojowej.

Jednak największe zjawisko kwantowe zaobserwowano przez przypadek rok wcześniej. W 2017 roku zespół badaczy pod kierownictwem Davida Lidzeya eksperymentował na próbkach bakterii *Chlorobaculum tepidum*, oświetlając je laserem wewnątrz

pudełka o lustrzanych ściankach, co miało mieć wpływ na elektrony w ich komórkach przeprowadzających fotosyntezę.

Badacze nie zdali sobie sprawy z tego, na co zwróciła uwagę Chiara Marletto⁶² w następnym roku, że fotony światła laserowego splątały się z elektronami bakterii, powodując superpozycję ich stanów ze stanami fotonów wiązki światła. Stało się to możliwe z tego powodu, że pudełko było tak zalane światłem, iż nic innego nie mogło oddziaływać z bakteriami, co oznaczało, że ich splątane łączy z fotonami lasera mogły przetrwać przez rozsądnie długi czas. Stąd wniosek, że zjawiska kwantowe mogą zachodzić w żywych organizmach.

Żyjemy w naprawdę niesamowitym okresie historii fizyki i to, co może się wydarzyć, jest bezprecedensowe. Uważa się zazwyczaj, że mechanika kwantowa ogranicza się do świata w bardzo małej, mikroskopowej skali, do świata Ant-Mana z komiksu Marvela. Jednak w ciągu ostatnich kilku lat zaczęliśmy stosować kwantowe reguły do obiektów codziennego makroskopowego świata. Rozpoczął się wiek makroskopowego świata kwantowego.

⁵⁷ R. Ji-Gang i in., *Ground to Satellite Quantum Teleportation*, „Nature” 2017, t. 549, nr 7670, s. 70–73.

⁵⁸ X. S. Ma i in., *Quantum Teleportation Over 143 Kilometers Using Active Feed-forward*, „Nature” 2012, t. 489, nr 7415, s. 269–273.

⁵⁹ C. Bennett i in., *Teleporting an Unknown Quantum State via Dual Classical and Einstein–Podolsky–Rosen Channels*, „Physical Review Letters” 1993, t. 70, nr 13, s. 1895–1899.

⁶⁰ P. Ball, *Quantum Teleportation is Even Weirder Than You Think*, „Nature Column: Muse”, 20 lipca 2017 r.

⁶¹ Y.H. Kim i in., *A Delayed Choice Quantum Eraser*, „Physical Review Letters” 2000, t. 84, s. 1–5.

⁶² C. Marletto i in., *Entanglement Between Living Bacteria and Quantized Light Witnessed by Rabi Splitting*, „Journal of Physics Communications” 2018, t. 2, nr 40.

Rozdział 10

Mechanika kwantowa dowodzi, że jestem Batmanem

Więcej sposobów obdarcia ze skóry kota Schrödingera

Próbując zrozumieć mechanikę kwantową, stajemy zawsze przed ważnym pytaniem: czy jest coś lepszego od kopenhaskiego wzruszenia ramionami i stwierdzenia „tak po prostu jest”?

Większość podręczników fizyki omawia interpretację kopenhaską, ponieważ Bohr uchodził zawsze za wielką szycę i przez dziesięciolecia jego podejście było tym jedynym. Jednak w dzisiejszych czasach interpretacja kopenhaska nie jest już jedyną opcją.

Oczywiście prędzej czy później musimy porzucić klasyczne idee, a każda interpretacja mechaniki kwantowej będzie związana z poważnymi dziwactwami, ale od czasu świętej interpretacji kopenhaskiej opracowano duży wybór alternatywnych interpretacji.

Trudno stwierdzić, które interpretacje mechaniki kwantowej należałoby włączyć do książki takiej jak ta, w istocie bowiem mogłyby wypełnić całą bibliotekę. Postanowiłem zaufać memu instynktowi i omówić trzy interpretacje teorii kwantów, które wynaleźli entuzjaści fantastyki naukowej, rozszerzając dokonania uprzednio żyjących gigantów.

Zapomnijcie, co powiedziałem wcześniej

W 1927 roku Louis de Broglie wygłosił wykład na piątej Konferencji Solvaya w Brukseli. Konferencje te były spotkaniami towarzyskimi fizyków, organizowanymi przez belgijskiego przemysłowca Ernesta Solvaya, który w latach sześćdziesiątych XIX wieku zarobił miliony na wynalezionej przez siebie przemysłowej metodzie produkcji węglańu sodu (składnika niezbędnego do produkcji szkła).

Solvay wyobrażał sobie owe kongresy jako coś podobnego do letniego obozu dla uczonych. Chciał zebrać na miesiąc w jednym budynku najmądrzejszych ludzi na świecie i pozwolić im, by omawiali fundamentalne zagadnienia nauki. Wygłaszano by wykłady, organizowano debaty i kruszono kopie w sprawach najważniejszych dla fizyki.

Pierwsza konferencja w 1911 roku dotyczyła teorii kwantów Plancka i Einsteina. Druga (1913) – struktury materii, trzecia (1921) – atomów i światła, czwarta (1924) – elektryczności, a piąta poświęcona była interpretacji kopenhaskiej i temu, czy powinna ona na zawsze panować. W tym legendarnym wydarzeniu uczestniczyli tacy uczeni jak Schrödinger, Heisenberg, Sommerfeld, de Broglie, Bohr, Born, Planck, Maria Curie, Einstein i wielu innych.

Istnieje słynne zdjęcie obecnych tam uczonych siedzących na trybunach, które ma charakter najdziwniejszego zdjęcia z książki pamiątkowej jakiejś szkoły. Madame Curie jest jedyną kobietą, Schrödinger jako jedyny ma muszkę, a chemik Paul Debye jako jedyny nosi wąsy w stylu Charliego Chaplina, które wyszły z mody w następnym dziesięcioleciu (z dość oczywistych powodów).

Na tej konferencji wymowny i sympatyczny Louis de Broglie przedstawił to, co uważał za realną alternatywę dla interpretacji kopenhaskiej. Uznał, że popełnił błąd, wprowadzając dualizm korpuskularno-falowy, a elektrony i fotony są tylko cząstkami. Nie mają charakteru falowego, lecz są otoczone jakąś substancją tła, w której *występują* fale. Te niewidzialne „fale pilotujące” dyrygują cząstkami i w ten sposób wydaje się, że poruszają się one wzdłuż falopodobnych trajektorii.

Zgodnie z legendą, gdy francuski uczony prezentował swój pomysł, był zakrzykiwany przez aroganckiego Wolfganga Pauliego, który miał reputację człowieka przerywającego mówcom, jeśli nie czuł, że ich wykład jest na odpowiednim poziomie. Pauli był świetnym fizykiem (opracował teorię splątania, którą omawialiśmy w dwóch poprzednich rozdziałach), ale samą swą obecnością zastraszał mówcę, a de Broglie z zasady był miły w obejściu.

De Broglie z godnością traktował Pauliego, choć ten mu ciągle przerywał. Przyznał, że w jego hipotezie tkwiły błędy, ale po zakończeniu wykładu wszyscy byli bardziej zainteresowani pytaniami Pauliego niż odpowiedziami de Broglie'a, a o pomysł fal pilotujących zapomniano.

Dopiero w 1952 roku koncepcja ta została ponownie wyciągnięta na światło dzienne przez Davida Bohma, fizyka jądrowego, który jako chłopiec odkrył swoją miłość do nauki dzięki czasopismom fantastycznonaukowym⁶³ i który brał udział w projekcie Manhattan w czasie II wojny światowej.

Przez większość czasu Bohm był zwolennikiem interpretacji kopenhaskiej, ale gdy został przekabacony przez Einsteina, zaczął odczuwać, że wymaga ona przyjmowania zbyt wielu założeń na wiarę, i zwrócił się ku teorii fal pilotujących de Broglie'a.

Wydawało się nawet, że ma ona jakieś przyzwoite podstawy eksperymentalne. Jeśli wyśle się falę na wodzie w kierunku podwójnej szczeliny, podobnie jak zrobił to Thomas Young, powstanie oczywiście wzorzec interferencyjny, ale jeśli umieści się na powierzchni takich fal jakiś mały przedmiot, na przykład kroplę oleju, będzie ona pływała po nich jak łódź w czasie sztormu, niesiona ku jednemu z prążków zebry na dalekim końcu. Wciąż jest to cząstka, ale jej cel określa fala pilotująca.

Wyzwanie, przed którym stanął Bohm, polegało na tym, że elektron za każdym razem powinien podążać po tych samych trajektoriach, ale w prawdziwym eksperymencie kwantowym może on się pojawić w każdym z prążków zebry na pozór przypadkowo. Aby sobie z tym poradzić, Bohm zaproponował, że kiedy każdy z elektronów wylatuje z emitera, ma zmienne ukryte – małe

wahania energii, których nie możemy wykryć, a które w rezultacie powodują pokonywanie podwójnej szczeliny różnymi drogami.

Z matematycznego punktu widzenia pogląd Bohma na mechanikę kwantową ma dodatkową warstwę złożoności, ponieważ trzeba mówić o wartościach takich fal pilotujących (zwanym potencjałami kwantowymi), a to oprócz równania Schrödingera wymaga rozwiązywania dodatkowych równań. Natomiast po stronie „plusów” znajduje się odpowiedź na pytanie, dlaczego wydaje się, że własności cząstki ujawniają się dopiero w czasie jej detekcji – własności takie jak położenie i spin pochodzą od fali pilotującej, a nie od cząstki. Z tego to powodu odnosi się wrażenie, że czasami cząstki nie mają własności, naprawdę bowiem ich nie mają – ma je fala pilotująca.

Bohm, słodki Bohm

Zgodnie z poglądem de Broglie’a–Bohma zachowanie kwantowe nie jest naprawdę przypadkowe, ponieważ wyniki rozpraszania na podwójnej szczelinie teoretycznie można wytłumaczyć prawami fizyki klasycznej. W 2010 roku Yves Couder stworzył eksperyment mający precyzyjnie tego dowieść.

Couder przeprowadził doświadczenie z podwójną szczeliną w zbiorniku z wodą i na jej powierzchni umieścił maleńkie kropelki oleju, obserwując, jak się poruszają. Kropelki oleju miały być cząstkami, a fale na wodzie falami pilotującymi.

Badacz relacjonował, że kropelki oleju podążały za krajobrazem fal wodnych i gromadziły się w większe krople na drugim końcu zbiornika, podobnie jak fotony i elektrony⁶⁴. Czy to możliwe, że cząstki mimo wszystko miały położenia i po prostu poruszały się na fali pilotującej jak klasyczne obiekty?

Był to fascynujący wniosek i wydawało się, że w końcu interpretacja kopenhaska została zrzucana z tronu, ale wyglądało to zbyt pięknie, by mogło być prawdziwe. Dalsze badania przeprowadzone przez fizyków Johna Busha i – jakże stosownie – wnuka Nielsa Bohra, Tomasza, nie odtworzyły tych wyników⁶⁵.

i badacze doszli do wniosku, że Couder popełnił kilka niezamierzonych błędów w ustawieniach swego eksperymentu.

Jeśli spróbujemy odtworzyć eksperyment na podwójnej szczelinie z rzeczywistymi cząstkami na rzeczywistych falach, to otrzymamy klasyczne wyniki i żadnych prążków zebry. Nie można wyjaśnić wyników eksperymentu na podwójnej szczelinie za pomocą mechaniki Bohma, chyba że fala pilotująca jest jakimś szczególnym rodzajem fali, która zachowuje się w sposób nieklasyczny. To może być oczywiście odpowiedź, ale jej skutek jest taki, że przenosi kwantowe dziwactwo z cząstki na falę pilotującą, której, co za korzystny zbieg okoliczności, nigdy nie możemy zaobserwować.

Uścisk dłoni

Interpretacja transakcyjna, którą teraz omówimy, wyciera interpretacją kopenhaską podłogę i pokazuje środkowy palec zdrowemu rozsądkowi, ale jest niezwykle fajna, warto więc się jej przyjrzeć.

Tym razem oryginalny pomysł pochodzi od Richarda Feynmana, który wykazał, że na poziomie kwantowym fizyka działa w czasie równie dobrze do przodu, jak i do tyłu. Cząstka poruszająca się w lewo to odwrotność cząstki poruszającej się w prawo i oba procesy są na równi dozwolone. Cząstki nie mają preferencji co do kierunku, w którym upływa czas. Elektron emitujący foton może być postrzegany równie dobrze jako biegnący w czasie wstecz elektron *absorbujący* foton. Oba te zdarzenia są równie realne.

Pięćdziesiąt lat później profesor fizyki i autor powieści fantastycznonaukowych John Cramer postanowił wziąć pomysł Feynmana na warsztat i posunąć go do przodu. I, jak przypuszczam, do tyłu również.

Zachowanie cząstki jest opisane funkcją falową, ale pamiętaj, że aby uzyskać wynik, trzeba ją pomnożyć przez samą siebie. Cramer zastanawiał się, czy powodem, dla którego potrzebujemy dwóch identycznych funkcji falowych, jest to, że rzeczywiście są dwie, ale

widzimy tylko jedną, ponieważ jej partnerka porusza się w czasie wstecz.

Powiedzmy, że nasza cząstka zbliża się do podwójnej szczeliny. Jej normalna funkcja falowa (niestety nazywana w literaturze falą „opóźnioną”) przesuwa się w czasie do przodu po wszystkich możliwych do przebycia trajektoriach. Jednak w tym samym czasie cząstki na ekranie detektora wysyłają funkcje falowe wstecz z przyszłości (zwane falami „przedwczesnymi”) w kierunku naszej cząstki. Ta cząstka z przyszłości, która wyśle najsilniejszy sygnał w czasie wstecz, jest tą, z którą nasza cząstka wchodzi w oddziaływanie.

Cramer wyobraża to sobie jako transakcję biznesową, w której cząstka emituje ofertę, a detektor wysyła potwierdzenie. Cząstka zbliżająca się do szczeliny i cząstka w detektorze synchronizują funkcje falowe tym, co on nazywa kwantowym uściskiem dłoni prowadzącym do splątania przeszłości, teraźniejszości i przyszłości.

Eksperymenty z kwantową gumką opóźnionego wyboru, te dziwaczne, w których Alicja wie, co Bob robi w przyszłości, są nagle łatwe do wyjaśnienia. Cząstka może wiedzieć, czy zostanie wykryta w przyszłości, ponieważ otrzymuje wiadomość z przyszłości, w której jest zawarta ta informacja.

Co ciekawe, Cramer powiedział, że nie uważa, aby jego interpretacja miała na celu pozbycie się ludzkiej wolnej woli⁶⁶. Posługuje się analogią do karty debetowej używanej do zapłacenia za coś w supermarkecie. Fala oferująca to karta, a fala potwierdzająca to bank, ale wciąż należy wybrać to, co chce się kupić.

Można jednak zaproponować kontrapunkt. Kiedy wydaje ci się, że postanawiasz kupić, powiedzmy, mleko migdałowe, w rzeczywistości dotarł do ciebie sygnał od tych migdałów z przyszłości mówiących ci, co masz robić. Być może każda decyzja, jaką – jak ci się wydaje – podejmujesz, w rzeczywistości jest wynikiem przyszłego wydarzenia, które kieruje twoimi obecnymi wyborami życiowymi. Czy naprawdę to był twój pomysł, by kupić tę książkę, czy też wpłynąłem na ciebie z tego rozdziału? WoooOOOOOOOOOOOOOOO (upiorny hałas duchów).

*And I Will Always Love Hugh*⁶⁷

W tym samym roku, w którym David Bohm opublikował swoją teorię fali pilotującej, Erwin Schrödinger wygłosił w Dublinie wykład o tym, dlaczego nadal nie akceptuje interpretacji kopenhaskiej. Wyjaśnił w nim, że choć może sprawiać wrażenie szaleńca, to jego równanie nigdy nie miało na celu opisanie sytuacji, w której cząstki wybierają własność podczas pomiaru⁶⁸.

Wiadomo tylko tyle, że w stanie superpozycji dwa zestawy własności unoszą się wokół tej samej cząstki. Ale skąd pomysł, że musimy odrzucić jedną z tych własności w momencie dokonywania pomiaru? W równaniu nie ma niczego, co mówiłoby, że musi się to stać. Istotnie, jeśli dosłownie potraktujemy równanie (które zawsze zdaje się poprawne), to pokaże nam ono, że po pomiarze oba wyniki wciąż tam są, nawet jeśli z jakiegoś powodu nie możemy zobaczyć jednego z nich.

Równanie Schrödingera jest gładkie i opisuje zjawiska ewoluujące stopniowo, ale kiedy cząstka oddziałuje z detektorem, Bohr nalegał, abyśmy nagle zmienili fizykę i zaczęli używać zamiast tego równań dla masywnych cząstek. Dlaczego miałoby tak być?

Jeśli ufamy równaniu Schrödingera, to nie mówi ono nic takiego. Wszystkie wyniki się zdarzają i nie ma czegoś takiego jak „kolaps” funkcji falowej. Kiedy mierzymy elektron ze spinem w górę, to jego stan ze spinem w dół nadal gdzieś istnieje. Musimy się tylko dowiedzieć, gdzie się ukrywa. I tu na scenę wstępuje Hugh Everett III.

Everett, palący jednego papierosa za drugim i pasjonat literatury fantastycznonaukowej, mający tytuł licencjata w dziedzinie chemii i magistra w dziedzinie matematyki, postanowił, że powinien również uzyskać doktorat z fizyki, aby mieć trio w komplecie. Pracując pod kierownictwem Johna Archibalda Wheelera, miał za zadanie wymyślić nową wersję mechaniki kwantowej, która nie miałaby związku z pojęciem prawdopodobieństwa.

W kopenhaskim klubie wszyscy byli rozmiłowani w przypadkowości, ale Wheeler, stawiając temu opór, postawił swojemu najbystrzyszemu uczniowi zadanie i nie zawiódł się na nim. Everett

wymyślił rozwiązanie, które nie tylko pozbywało się przypadku, lecz także uwzględniało problem pomiaru.

Kiedy w eksperymencie jest mierzona cząstka, urzeczywistniają się wszystkie możliwe wyniki. Ten, który obserwujemy, zostaje zapisany w naszym laboratorium, ale pozostałe możliwe wyniki są tam nadal. Tyle że istnieją w innych wszechświatach.

Everett doszedł do wniosku, że superpozycja jest głównym bólem mechaniki kwantowej, wyeliminował więc tę ideę przez zastosowanie nakładających się na siebie rzeczywistości zamiast nakładających się na siebie własności. Kiedy cząstka ma wybór, wszechświat się rozwidla i każdy wybór jest podejmowany przez inną, równoległą wersję tej samej cząstki.

Superpozycja stanów nie jest tak naprawdę cząstką istniejącą w sposób pełen sprzeczności, są to całe wszechświaty leżące jeden na drugim jak obrazy na kalce kreślarskiej ułożone w stos.

Dopóki stan cząstki nie ulegnie zbyt mocnemu splątaniu z otoczeniem, dopóty wszystkie wszechświaty biorące udział w kwantowym eksperymencie pozostają w kontakcie. Gdy zaś tylko dojdzie do splątania (powiedzmy z ekranem detektora), rozchodzą się i stają niezależnymi rzeczywistościami.

W jednym wszechświecie cząstka może przejść przez lewą szczelinę, a w drugim może przejść przez prawą. Oba wyniki pozostają razem pomieszane, dając nam wzór interferencyjny w stanie zawieszenia, ale gdy osiągnięty zostanie ekran detektora, każda wersja cząstki trafia na ekran w innym miejscu – każda w swoim własnym wszechświecie.

Jeśli zmierzysz szczeliny swoim „przyrządem”, to tak naprawdę nie odkrywasz, którą szczelinę wybiera cząstka, lecz dowiadujesz się, w którym wszechświecie jesteś. Kiedy więc mierzysz cząstkę przechodzącą przez lewą szczelinę, równoległa wersja ciebie mierzy ją również przechodzącą przez prawą. W podejściu Everetta, znanym jako „interpretacja wielu światów”, nie mamy już do czynienia z prawdopodobieństwem i pomiarem. Akceptujemy jedynie fakt, że widzimy jedną część większej uniwersalnej całości.

Wyobraźmy sobie, że w 40 procentach równoległych wszechświatów znajduje się cząstka przeznaczona na centralny

prążek naszego wzorca zebry. Logicznie rzecz biorąc, masz 40 procent szans na znalezienie się w jednym z tych wszechświatów, ale na początku eksperymentu nie wiesz na pewno, gdzie jesteś. Wszystko, co możesz powiedzieć, to to, że masz 40-procentową szansę na to, iż cząstka uderzy w środek twojego ekranu.

Elektron w ogóle nie decyduje o tym, dokąd ma losowo polecieć. W tym samym czasie elektrony w równoległych wszechświatach lecą wszędzie, ale ponieważ widzimy tylko to, co zachodzi w pojedynczym wszechświecie, taki wynik wygląda, jakby był nieprzewidywalny. Jest to wytłumaczenie o wiele bardziej eleganckie niż interpretacja kopenhaska, ponieważ bez powodu nie musimy wywalać połowy odpowiedzi. Po prostu przyznajemy, że dzieje się to w innej rzeczywistości.

Ostatecznie kot żyje

To wreszcie dobre wieści! Kiedy twój kot znajduje się w stanie superpozycji martwy/żywy, oznacza to, że naprawdę jest żywy i martwy w równoległych wszechświatach. Jeśli zdarzy ci się otworzyć pudełko i odkryć martwą kicię, nie musisz się martwić, ponieważ alternatywna wersja ciebie znajduje ją żywą i mającą się dobrze.

Interpretacja wielu światów wyjaśnia również paradoks EPR, pozwalając jednocześnie szczególnej teorii względności przetrwać bez skazy. Kiedy dwie splątane cząstki są wysyłane na przeciwległe końce Układu Słonecznego, ich własności są już na wstępie ustalone, tak jak wierzył Einstein, ale istnieją dwa wszechświaty z przeciwnymi wynikami.

W jednym wszechświecie Alicja ma spin w górę, a Bob w dół, ale w drugim Bob ma spin w górę, a Alicja w dół. Przed pomiarem nie wiemy, który wszechświat jest który, uważamy więc wynik za losowy, ale to dlatego, że nasze wszechświaty się nie rozeszły. Kiedy dokonamy pomiaru i znajdziemy się we wszechświecie, w którym Alicja ma spin w górę, oba wszechświaty się rozdzielają, co oznacza,

że ten, w którym Alicja ma spin w dół, a Bob w górę, zostaje uniesiony gdzieś do wieloświata (wszechświata wszechświatów).

Nikt nie wie, jak to rozszczepienie zachodzi, ale wydaje się, że tak się dzieje za każdym razem, gdy cząstka ma możliwość jakiegoś wyboru. Zdaniem Everetta nie chodzi tu o pomiar, tylko o wybór.

Teraz, kiedy siedzisz i to czytasz, każdej cząstce w twoim ciele dano wybór, jak ma drgać wokół jądra. W jednym wszechświecie obierają one jeden kierunek, a w innym odwrotny. Jeżeli weźmiesz pod uwagę, ile cząstek jest teraz we Wszechświecie i jak długo on istnieje, to sama liczba dokonanych wyborów okazuje się tak ogromna, że nawet nie sposób nadać jej nazwy.

W każdej nanosekundzie twoje ciało dzięki samemu istnieniu powoduje, że biliony wszechświatów odrywają się od siebie i rozpadają na zawsze. Liczba równoległych rzeczywistości jest tak duża, że nikt nawet nie próbował oszacować, ile ich będzie dzisiaj. Co prowadzi nas do...

Najważniejsza część książki

Z biegiem lat tacy luminarze nauki jak Richard Feynman i Stephen Hawking wyrazili swoje poparcie dla interpretacji wielu światów⁶⁹ Everetta, ale na początku, kiedy została ona ogłoszona, jej twórcę wyśmiano, zatem zdecydował się on porzucić całą sprawę, by pracować dla wywiadu wojskowego.

W swej ostatniej woli nalegał, aby wyrzucić jego prochy do śmieci, ponieważ był człowiekiem na wskroś rzeczowym⁷⁰ i uważał, że nawet jeśli umarł w tym Wszechświecie, to nadal żyje w wielu innych.

Możemy tak powiedzieć, ponieważ każda trajektoria jest wybierana w co najmniej jednej rzeczywistości, różne procesy mózgowe i zdarzenia są więc wybierane w różnych światach i w taki oto sposób każdy równoległy wszechświat ma własną wersję historii. Wszystko, co można sobie wyobrazić, prawdopodobnie gdzieś się wydarzyło.

Oczywiście prawa fizyki są nadal prawdziwe. Nie będzie wszechświata, w którym ludzka skóra jest zrobiona z chmur, a żaby

jarzą się, gdy na nie zagwizdziesz. Wszystko się dzieje, przynajmniej gdzieś, pod warunkiem że zgodnie ze standardowymi zasadami.

Jest taki wszechświat, w którym Ameryka nie wygrała wojny o niepodległość. Jest taki wszechświat, w którym mur berliński wciąż stoi. Jest taki wszechświat, w którym Osmondowie pozostali przy muzyce rockowej po *Crazy Horses* i nigdy nie powrócili do słodkich ballad miłosnych. I, co najważniejsze, jest tam wszechświat, daleko w głębi wieloświata, w którym ja, Tim James, jestem Batmanem.

Decyzje, decyzje

Debaty szaleją. W czasie pisania tej książki wciąż nie istnieją eksperymenty, które odróżniałyby jedną interpretację mechaniki kwantowej od drugiej, żadna z nich więc nie może rościć sobie prawa do tytułu ostatecznej.

Interpretacja kopenhaska pozostawała na piedestale przez większą część XX wieku i nadal jest najbardziej popularna. Jest jednak również najbardziej irytująca, ponieważ wymaga dodawania czegoś ekstra i przyjmowania kilku rzeczy na wiarę.

Interpretacja de Broglie'a–Bohma jest najbardziej skomplikowana matematycznie i zmusza nas do włączenia zmiennych ukrytych i ukrytych fal pilotujących, ale jeśli jest prawdziwa, to daje nam klasyczne wyjaśnienie zagadnienia pomiaru, a to wystarczy, aby mieć o niej wiedzę.

Interpretacja transakcyjna jest unikatowa wśród wszystkich interpretacji, ponieważ jako jedyna wyjaśnia, dlaczego równanie Schrödingera potrzebuje dwóch funkcji falowych, a nie jednej, ale nie przewiduje wszechświata, w którym jestem Batmanem, powinniśmy więc ją odrzucić tylko z tych powodów.

Interpretacja wielu światów nie wymaga dodawania niczego nowego do równań (tylko nowych wszechświatów) i jest zdecydowanie najbardziej elegancka. Ale czy to nie za wiele, by strawić pomysł, że całość istnienia może być stale dzielona na równoległe wersje?

Wybranie, która interpretacja jest prawdziwa, nie jest jeszcze możliwe. Mamy równie słuszne hipotezy, zatem wyróżnienie jednej ze wszystkich jest kwestią preferencji i niczym więcej, lecz to nie oznacza, że wszystkie pozostałe nie mogą sobie być.

W 2013 roku Maximilian Schlosshauer zapytał grupę trzydziestu trzech fizyków kwantowych zgromadzonych na konferencji, którą interpretację preferują⁷¹. Czternastu wybrało Kopenhagę, sześciu – wiele światów (przynajmniej w tym Wszechświecie, w innym wybrali inaczej), nikt nie opowiedział się za interpretacją transakcyjną ani de Broglie’a–Bohma, a kilku głosowało za opcjami, których tutaj nie omawialiśmy.

Cztery osoby nie udzieliły żadnej odpowiedzi i być może były najprawdziwszymi naukowcami z tej grupy. Przecież jeśli pojawia się pytanie, na które nie da się odpowiedzieć z braku dowodów, takich czy innych, to uczciwie jest powiedzieć „nie wiem”. Jak jednak kiedyś zauważył Isaac Asimov, ludzie są zarówno istotami emocjonalnymi, jak i myślącymi⁷² i pod warunkiem że nie jesteśmy zobowiązani do wyboru bezwzględnego, nie ma nic złego w preferowaniu ulubieńca. Wybierz więc tę z nich, która sprawia największy ból twemu mózgowi, i radź sobie z nią.

⁶³ W. Keepin, *Lifework of David Bohm* (11 marca 2008 r.), dostępne w: http://www.vision.net.au/~apaterson/science/david_bohm.htm (dostęp 15 grudnia 2018 r.).

⁶⁴ Y. Couder i in., *Walking Droplets: a Form of Wave-particle Duality at Macroscopic Level?*, „Europhysics News” 2010, t. 41, nr 1, s. 14–18.

⁶⁵ J. Bush i in., *Walking Droplets Interacting with Single and Double Slits*, „Journal of Fluid Mechanics” 2018, t. 835, s. 1136–1156; T. Bohr i in., *Double Slit Experiment with Single Wave-driven Particles and Its Relation to Quantum Mechanics*, „Physical Review E.” 2015, t. 92.

⁶⁶ J. Cramer, *The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics and Quantum Nonlocality* (2015), dostępne na: <https://arxiv.org/pdf/1503.00039.pdf> (dostęp 15 grudnia 2018 r.).

⁶⁷ Parafraza słów słynnej piosenki, po raz pierwszy zaśpiewanej przez Dolly Parton w 1974 roku, z równie słynnego filmu *Bodyguard* z 1992 roku (przyp. tłum.).

[68](#) D. Deutsch, *The Beginning of Infinity*, Penguin, Londyn 2012.

[69](#) F. Tipler, *The Physics of Immortality*, Bantam Doubleday Dell Publishing Group, Nowy Jork 2000.

[70](#) P. Byrne, *The Many Worlds of Hugh Everett III: Multiple Universes, Mutual Assured Destruction and the Meltdown of a Nuclear Family*, Oxford University Press, Oksford 2010.

[71](#) P. Ball, *Experts Still Split about What Quantum Theory Means*, „Nature News”, 11 stycznia 2013 r. Ankietę można znaleźć tu: <https://arxiv.org/pdf/1301.1069.pdf> (dostęp 15 grudnia 2018 r.).

[72](#) I. Asimov, *Science and the Bible*, wywiad z prof. Asimowem przeprowadzony przez P. Kurtza we „Free Enquiry”, wiosna 1982.

Rozdział 11

Daleko

Trudne pytanie

Do tej pory w całej książce używaliśmy słowa „cząstka”, sporadycznie od niego odchodząc, ale nadszedł czas, żebyśmy dokładnie sprecyzowali pojęcia. Jeśli mamy poważnie mówić o fizyce cząstek, musimy zdecydować, co dokładnie rozumiemy przez cząstkę.

Najzgrabniejsza definicja, jakiej używają fizycy, brzmi: to „coś, co utrzymuje się w całości i nie rozpada spontanicznie”. W tym sensie twoje ciało jest dużą cząstką, ponieważ twoje ramiona nie odrywają się losowo (zazwyczaj), pasujesz więc do tej definicji.

Twoje ciało jest oczywiście cząstką złożoną, chociaż bowiem ma tendencję do trzymania się w całości, to może być rozbite na mniejsze cząstki – twoje organy – które również utrzymują się w całości. Organy można rozbić na cząstki zwane komórkami, a następnie na cząsteczki, potem na atomy i wreszcie na protony, neutrony i elektrony.

Natomiast elektron – przynajmniej na podstawie tego, co możemy obecnie stwierdzić – nie składa się z niczego mniejszego. Nie jest złożony z cząstek subelektronowych, ale trzyma się w całości. Jest to bardzo szczególny rodzaj cząstki, różnej od atomów, cząsteczek i komórek. Nie ma on żadnej podstruktury i dlatego jest naprawdę podstawowy.

Fantastyczny pan Faraday

Historia cząstek elementarnych zaczyna się w początkach XIX wieku od największego naukowego showmana tej ery, Michaela Faradaya. Faraday był synem biednego kowala, ale uważał, że nauka powinna stać się dostępna dla każdego, kto jest na tyle ciekawy, aby ją uprawiać. W tym celu zaczął wygłaszać w Royal Institution publiczne wykłady na tematy naukowe, olśniewając audytorium reakcjami chemicznymi i zjawiskami fizycznymi. Właśnie na tych wykładach po raz pierwszy ujawnił odkrycia dotyczące magnetyzmu, siły odmiennej od wszystkich innych.

Magnetyzm może działać przez próżnię i przyciągać lub odpychać inne magnesy, bez czegokolwiek pomiędzy nimi, co mogłoby przenosić sygnał. Może również działać mimo barier wykonanych z ciała stałego, co jest niezwykle charakterystyczne, wszystkie inne siły bowiem muszą być w bezpośrednim kontakcie z obiektem, który pchają lub ciągną.

Dzisiaj nic w magnetyzmie nie wydaje się niezwykle, ponieważ żyjemy w świecie telefonów komórkowych i routerów wi-fi, ale w XIX wieku wywieranie wpływu na przedmiot bez dotykania go było równoznaczne z czarami. Aby wyjaśnić, jak magnesy mogą tak działać, Faraday zachęcał swych słuchaczy, by myśleli o magnetyzmie jako wytworzonym z „pola”, a nie z materii.

Każdy magnes tworzy niewidzialne zniekształcenia geometrii otaczającej go przestrzeni, które działają na inne obiekty magnetyczne. Te rejony zniekształconej przestrzeni same nie są zbudowane z materii, dyktują jednak zachowanie poruszających się w nich cząstek.

Pole jest więc niematerialną, płynną substancją, która nadaje cząstkom charakter ruchu w trakcie przechodzenia przez nią. W niektórych miejscach może być silniejsze niż w innych, ale nie można tego bezpośrednio zobaczyć, tylko zorientować się dzięki jego wpływowi na ruch cząstki.

Pomysł może wywoływać konsternację, ponieważ jesteśmy przyzwyczajeni do obiektów zrobionych z innych rzeczy, a rzecz istniejąca, choć niewykonana z czegokolwiek, nie jest łatwa do strawienia, ale takie właśnie wydaje się pole. Pusta przestrzeń, jak się zdaje, też może mieć własności.

A to przypomina mi żart: słyszałeś o strachu na wróble, który zdobył Nagrodę Nobla? Był znakomity na swoim polu.

Nie zamierzam przeproszać za ten dowcip, tak jak Michael Faraday nie przeprosił za wprowadzenie pól do fizyki. Po prostu nie ma sposobu na wyjaśnienie takich zjawisk jak magnetyzm, ładunek elektryczny czy grawitacja bez wprowadzenia pojęcia pola. A co więcej, pola mogą ze sobą oddziaływać.

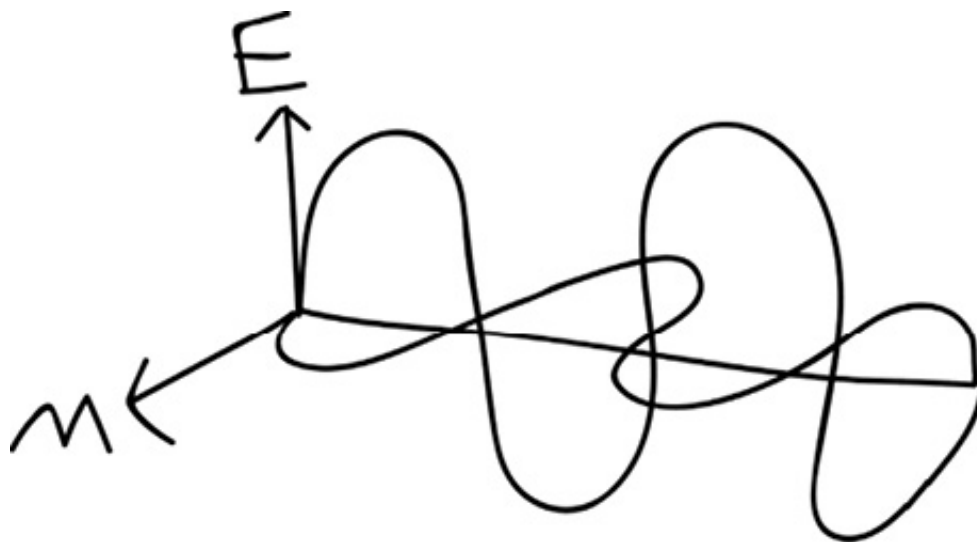
Jedno pole czy dwa, pastorze?

Jeśli weźmiesz magnes i będziesz nim poruszać w górę i w dół, stworzysz pionowe zafalowanie w polu magnetycznym, ale to nie wszystko. Faraday odkrył, że robiąc tak, jednocześnie wytwarzasz zakłócenie pola elektrycznego, rozchodzące się prostopadle do pierwotnego zakłócenia magnetycznego.

Ta falka pola elektrycznego odbija się jednak od pola magnetycznego, które odwzajemnia przysługę przez ponowne wytworzenie zafalowania pola elektrycznego, ono zaś w odpowiedzi wzbudza pole magnetyczne, tam i z powrotem, bez końca.

Zafalowanie, które początkowo wytworzyłeś w polu magnetycznym, jest więc przenoszone zarówno przez pole elektryczne, jak i pole magnetyczne, które drgają nawzajem na krzyż wewnątrz siebie.

Te zafalowania nazywamy „falami elektromagnetycznymi” i przedstawiamy na rysunkach jako wznoszące się i opadające wstęgi, z wartościami pola elektrycznego i magnetycznego prostopadłymi do siebie, jak pokazano na poniższej ilustracji (pole elektryczne faluje na osi pionowej E , a pole magnetyczne faluje na osi poziomej M):



Rozdzielenie pola magnetycznego od elektrycznego wydaje się niemożliwe, ponieważ gdy jedno drga, drugie też to robi, czasami więc traktujemy je kolektywnie jako pojedyncze „pole elektromagnetyczne”, a nie dwa przeplatające się ze sobą pola.

Można sobie wyobrazić, jest szalenie skomplikowana jest matematyka potrzebna do opisanie tych nakładających się na siebie pól. Każdemu punktowi w przestrzeni musi być przypisana wartość mówiąca nam, jak punkt ten wpłynie na wlatującą tam cząstkę.

W każdym punkcie pola wyobrażamy sobie malutkie strzałki (zwane wektorami) wskazujące kierunek, w którym cząstka zostanie popchnięta. Następnie musimy umieścić wektor pola elektrycznego pod kątem prostym do każdego pola magnetycznego; również on będzie miał wpływ na ruch nadlatującej cząstki.

Teraz wyobraźmy sobie, co się stanie, jeśli poruszymy jednym z magnesów i stworzymy falę w polu elektromagnetycznym. Śledzenie nieskończonej liczby strzałek zmieniających kierunek i wielkość, obracających się pod kątem prostym do siebie, nie było zadaniem łatwym, zwłaszcza dla Faradaya, którego matematyczna wiedza nie sięgała dalej niż proste ułamki.

Gdy zaczęto kwestionować teorię pola, młody szkocki fizyk James Clerk Maxwell przyszedł z pomocą Faradayowi i opracował matematykę niezbędną do przeprowadzenia prawidłowych testów jego pól.

Równania Maxwella pomagały dokładnie przewidzieć, jak będą oddziaływać pola elektryczne i magnetyczne, a rozwiązania tych równań były zgodne z danymi eksperymentalnymi. Pojęciu pola wprowadzonemu przez Faradaya w końcu nadano matematyczną ścisłość, a szczerze mówiąc, był na to najwyższy czas.

Z równań Maxwella wynikała też zdumiewająca przepowiednia. Okazało się, że fale elektromagnetyczne powinny się rozprzestrzeniać ze specyficzną prędkością: 299 792 458 m/s. Wygląda znajomo? Oczywiście. To prędkość światła.

Oświeć mnie

Pewnego sobotniego wieczoru w 1846 roku (dokładnie było to 11 kwietnia) Faraday znalazł się w sali wykładowej Royal Institution, gdzie towarzyszył swojemu przyjacielowi Charlesowi Wheatstone'owi, który miał wygłosić publiczny wykład. Jednak Wheatstone dostał ataku paniki i wybiegł z budynku, pozostawiając przyjaciela samemu sobie. Aby nie rozczarować publiczności, Faraday zaimprovizował własny wykład o pomysle, nad którym ostatnio się zastanawiał⁷³.

Rozwahał cząstki poruszające się we wnętrzu obiektu i przyjął, że wytwarzają one fale elektromagnetyczne, które, gdy ulatują w zewnętrzną przestrzeń, zostają przechwycone przez nasze gałki oczne, co uświadamia nam obecność tych cząstek.

Zbieżność wartości liczbowej rozwiązań równań Maxwella ze zmierzoną eksperymentalnie wartością prędkości światła jest zbyt wielka, by mogło to być zwykłym zbiegiem okoliczności. Przypuszczenie Faradaya okazało się jak najbardziej poprawne. Medium odpowiedzialnym za fale światła (za którym opowiadali się zarówno Kartezjusz, jak i Thomas Young) było samo pole elektromagnetyczne.

Jeśli elektron (cząstka o właściwościach elektrycznych i magnetycznych) drga, to wytwarza falę, która przemieszcza się na zewnątrz z prędkością światła. Nie zobaczymy jej jednak, ponieważ

ma zbyt małą energię, aby została wykryta przez nasze oczy, ale antena radiowa mogłaby ją odebrać.

Gdy elektron drga szybciej, miliony razy na sekundę, fale elektromagnetyczne stałyby się widoczne, a elektron świeciłby na czerwono, potem na pomarańczowo, następnie na żółto, zielono, niebiesko, indygo i wreszcie na fioletowo.

Gdy elektron drga jeszcze szybciej, fale miałyby taką energię, że ponownie stałyby się niewidzialne, niewykrywane przez nasze oczy, tak jak wysoki ton gwizdka na psy nie jest wykrywany przez nasze uszy. Elektron emitowałby teraz promieniowanie ultrafioletowe i rentgenowskie.

W bardzo realnym sensie urządzenia, jak telefony komórkowe, nadajniki radiowe, koncentratory wi-fi, nadajniki Bluetooth, kuchenki mikrofalowe, piloty na podczerwień i skanery rentgenowskie – to tylko latarki. Częstość generowanego przez nie światła (miara tego, jak szybko oscyluje ich funkcja falowa) może być zbyt niska lub zbyt wysoka, aby nasze oczy mogły ją zobaczyć, ale wszystkie fale elektromagnetyczne są tym samym.

Nie ma żadnej koncepcyjnej różnicy między wiązką latarki przechodzącą przez szybę ze szkła a wiązką rentgenowską przechodzącą przez ludzką skórę. To energia fali i szerokość szczeliny energetycznej między powłokami elektronowymi materiału decydują o tym, czy fala jest odbita, czy też przechodzi. Zasada jest identyczna w obu przypadkach.

Ludzie widzą tylko ułamek kolorów niesionych przez pole elektromagnetyczne i Faraday otworzył nam oczy na to, jak bardzo jesteśmy ślepi. Gwiazdy, które obserwujemy w nocy, emitują nie tylko światło widzialne, lecz także fale radiowe, mikrofae, promieniowanie podczerwone, ultrafioletowe, rentgenowskie i promienie gamma.

Sam fakt, że widzimy gwiazdy w nocy, mówi nam również, iż pole elektromagnetyczne musi istnieć zarówno w przestrzeni kosmicznej, jak i na Ziemi, w przeciwnym razie nie byłoby medium, które mogłoby przenosić do nas energię. Pole elektromagnetyczne zalewa kosmos od jednej jego krawędzi do drugiej. Właśnie teraz w nim przebywasz.

Twoje oczy dostrzegają słowa na tej stronie dlatego, że elektrony na powierzchni strony przeskakują pomiędzy poziomami energii, zakłócając wokół nich pole elektromagnetyczne. Te zakłócenia elektromagnetyczne rozchodzą się w polu w kierunku twojej twarzy i w końcu docierają do twoich oczu, gdzie są absorbowane przez elektrony w siatkówce, a to wytwarza impulsy prądowe biegnące wzdłuż nerwu wzrokowego aż do mózgu. Drgania pola elektromagnetycznego są, w bardzo dosłownym sensie, jedynymi rzeczami, które kiedykolwiek widzieliście.

Lody i prześcieradła

Wszystko, co dotyczy pól gładko falujących itp., na razie jest bardzo klasyczne, ale dzięki Planckowi i Einsteinowi wiemy, że energia światła składa się z niepodzielnych kawałków: fotonów. Dlatego pod koniec lat dwudziestych XX wieku angielski fizyk o usposobieniu samotnika, Paul Dirac, postanowił wymyślić „kwantową teorię pola”, czyli wyjaśnienie istoty pola elektromagnetycznego w kategoriach pojęć teorii kwantów.

Nierozsądne jest stawianie komuś diagnozy po jego śmierci, ale najprawdopodobniej Paul Dirac miał osobowość autystyczną. Nie wykazywał zaangażowania w sprawy społeczne, nie pragnął rozgłosu ani prestiżu, zawsze dosłownie rozumiał to, co ludzie mówili, i w kontaktach ze swymi uczniami był tak powściągliwy, że żartobliwie wymyślili oni „jednostkę Diraca”, która określa tempo wypowiedzi wynoszące jedno słowo na godzinę⁷⁴.

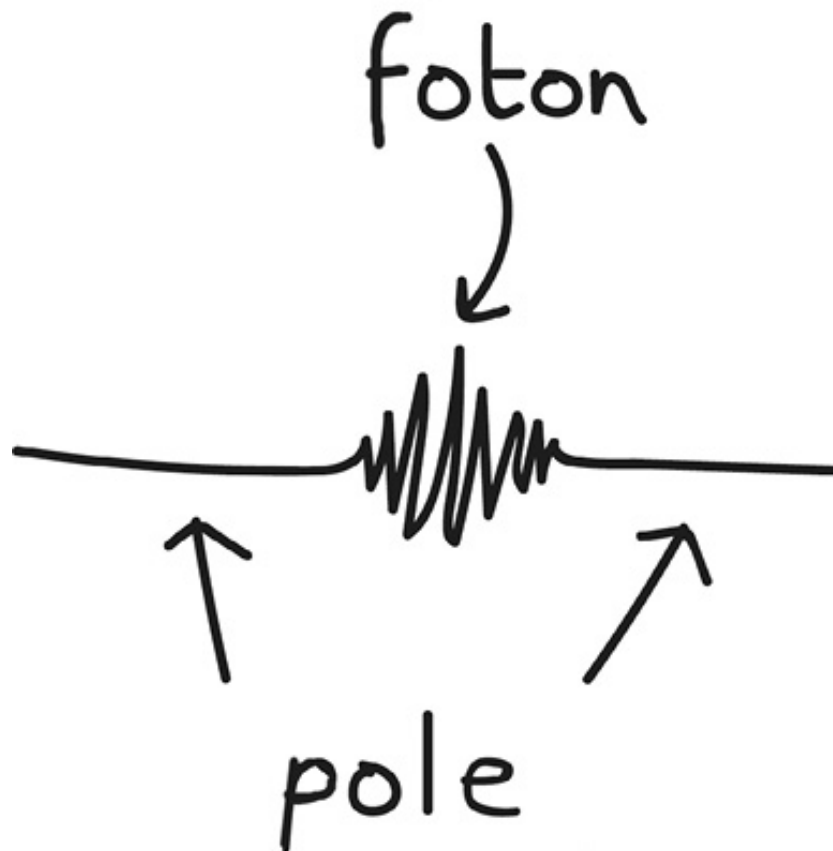
A oto kolejny żart. Czy słyszeliście kiedykolwiek o magicznym traktorze? Jechał drogą i skręcił w pole⁷⁵.

Ten żart działa (ledwo), ponieważ pomysł, by traktor dosłownie przemienił się w pole, jest absurdalny. Taka bryła jak traktor nie może zostać przemieniona w gładkie pole, ponieważ przedmioty i pola to odmienne w swej naturze kategorie. Nie da się ich wzajemnie przemieniać. Natomiast w kwantowej teorii pola właśnie tak robimy.

Foton jest cząstką (jest niepodzielną całością), ale ponieważ ma charakter falowy (a fala jest oscylacją w ośrodku leżącym w tle), musi istnieć jakieś pole, z którego foton został powołany do istnienia.

W terminach klasycznych mówimy o polach elektromagnetycznych falujących w górę i w dół, ale w terminach kwantowych traktujemy energię jak izolowany pik pola, podobny do pojedynczego piksu na monitorze serca.

Pole elektromagnetyczne jest łagodnym tłem dla naszego Wszechświata, ale jeśli jeden konkretny region zostanie wzbudzony, może spiąć się i skręcić w węzeł skoncentrowanej energii. Ten pakiet zaburzenia pola jest „kwantem pola elektromagnetycznego”. Grudka tła. Foton.



Rysowanie kwantów pola w trzech wymiarach jest trudne, większość analogii przedstawia więc pola jako płaską powierzchnię z cząstkami wyłaniającymi się z niej, tak jak wyżej.

Jedną z metod jest obraz gładkiego prześcieradła naciągniętego na materac. Jeśli skubniemy w pewnym miejscu prześcieradło, to możemy wytworzyć maleńką górkę na tkaninie, która będzie odzwierciedlać kwant pola. Prześcieradłową cząstkę.

Te kwanty (cząstki) pola mogą być przenoszone z jednego punktu do drugiego, dzięki czemu sprawiają wrażenie przemieszczania się przez pustą przestrzeń. Musimy tylko pamiętać, że pole ma otaczającą nas ze wszystkich stron trójwymiarową strukturę, z której fotony są wzbudzane.

Czasami myślę o tym jak o nabieraniu łyżką kulki lodów. Płaska powierzchnia lodów przed zanurzeniem do niej łyżki jest niezakłóconym polem elektromagnetycznym i kiedy wycinamy w niej małe kulki, to są to fotony wykrywane przez nas w eksperymentach.

Tak naprawdę powinniśmy nazywać pole elektromagnetyczne polem fotonowym, ale wiadomo, jak fizycy uwielbiają trzymać się przestarzałej terminologii (taki „spin” na przykład).

Nie składasz się z cząstek

Paul Dirac wyjaśnił na gruncie matematyki, w jaki sposób możemy otrzymywać fotony z pola fotonowego/elektromagnetycznego, i wykazał, że każdy rodzaj cząstek, ponieważ ma charakter falowy, może być uważany za kwant własnego pola⁷⁶.

Wszędzie we Wszechświecie istnieje pole elektronowe, nakładające się na pole elektromagnetyczne, a kiedy je zakłócimy, wytryskuje z niego elektron. Wszystkie cząstki, w tym te w naszych ciałach, tak naprawdę są wzbudzonymi drganiami niewidzialnych pól podstawowych.

Cząstki, z których jesteśmy stworzeni, i pusta przestrzeń nas otaczająca nie są wcale rozdzielone. Jesteśmy zbudowani z pakietów energii unoszonych przez pola powstałe z nicości. Tylko od ciebie zależy, czy fakt ten uznasz za niepokojący, czy piękny.

⁷³ I. Asimov, *New Guide to Science*, Penguin Press Science, Harmondsworth 1993.

[74](#) G. Farmelo, *Przedziwny człowiek: sekretne życie Paula Diraca, geniusza mechaniki kwantowej*, przeł. T. Lanczewski, Copernicus Center Press, Kraków 2016.

[75](#) W oryginale nieprzetłumaczalna gra słów: *turned into a field* oznacza zarówno „skręcił”, jak i „zamienił się” w pole (przyp. red.).

[76](#) P. Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics*, Dover Publications, Nowy Jork 2001.

Rozdział 12

Linie i zawijasy

Jedna teoria ma rządzić wszystkim

Paul Dirac miał nadzieję, że kwantowe teorie pól pozwolą kiedyś wyjaśnić każde możliwe zjawisko fizyczne. Każda cząstka byłaby traktowana jak kwant pola, a oddziaływania między polami byłyby podstawą oddziaływań między cząstkami. Idea ta wyznaczała potencjalny przełom w fizyce, ale niestety była ona tak skomplikowana, że niewiele osób było w stanie ją stosować.

Matematyka kwantowych teorii pól jest trudna. Szalenie trudna. Istnieje nawet nagroda w wysokości miliona dolarów oferowana przez Instytut Matematyczny Claya temu, kto rozwiąże jedno z najtrudniejszych zadań kwantowej teorii pola (*udowodnić, że dla dowolnej prostej zwartej grupy cechowania kwantowe pole Yanga-Millsa istnieje i ma lukę masową*. Podaję na wypadek, gdybyście zechcieli je rozwiązać w ten weekend).

Aby podjąć próbę dokonania postępu w ramach tak trudnego zagadnienia, Dirac proponował, abyśmy zaczęli od czegoś łatwiejszego i wzięli pod uwagę tylko dwie najprostsze cząstki/pola: elektrony i fotony. Oddziaływanie między nimi nazwał „elektrodynamiką kwantową”, w skrócie QED, i miał nadzieję, że jeśli uda się opracować szczegółową teorię QED, będziemy mogli dodawać inne cząstki i posuwać się dalej.

Swoją książkę z 1930 roku *The Principles of Quantum Mechanics* (Zasady mechaniki kwantowej) Dirac podsumował tymi słowami:

„wydaje się, że potrzebne są tu jakieś zasadniczo nowe idee fizyczne”. Bardzo powściągliwie, ale trudno się dziwić, biorąc pod uwagę skrytą naturę samego uczonego.

Jego słowa unosiły się w społeczności fizyków podobnie jak delikatna bryza, lecz w końcu zakiełkowały w umyśle człowieka, który był z pewnością przeciwieństwem Diraca. W umyśle najbardziej charyzmatycznego i barwnego indywidualisty nauki: Richarda Phillipsa Feynmana.

Mały bębniarz

Richard Feynman, urodzony w Nowym Jorku w rodzinie sprzedawcy mundurów, zawsze wykazywał ogromny talent do fizyki. Jego indeks IQ wynosił 123 (wynik całkiem dobry, choć nie zadziwiający), ale już jako dorosły Feynman był uważany za najzdolniejszego naukowca na świecie, porównywalnego nawet z Einsteinem.

Chcę dać wam jakieś pojęcie o tym, jak bardzo był błyskotliwy. W 1958 roku, kiedy NASA wystrzeliła satelitę Explorer II, podczas jej wznoszenia się coś poszło nie tak i rakietę nigdy nie osiągnęła orbity. Feynman założył się z inżynierami NASA, że szybciej niż ich komputer obliczy, gdzie spadnie satelita. Nie tylko wygrał zakład, lecz także obliczył współrzędne dokładniej. Dwa razy dokładniej⁷⁷.

Feynman był również duszą każdej imprezy, na którą został zaproszony, i bawił swoich licznych przyjaciół umiejętnością otwierania sejfów, grą na bongosach i żonglerką cyrkową. Na cotygodniowy wykład rozkładano dla niego czerwony dywan, lecz wolny czas spędzał w barach z występami topless, wykonując obliczenia na serwetkach lub szkicując tancerki, a czasem mężczyzn je oglądających⁷⁸.

Feynman, zdolny gawędziarz i bezwstydnym żartowniś, był Hanem Solo fizyki, ale przede wszystkim stanowił najtęższy umysł tego pokolenia.

Rozpoczął studia w MIT, potem przeniósł się do Princeton (zdając egzamin wstępny z wynikiem doskonałym), aby ukończyć doktorat

pod kierunkiem Johna Archibalda Wheelera, który był także promotorem Hugh Everetta.

W połowie swego doktoratu został zatrudniony przez Roberta Oppenheimera przy projekcie bomby atomowej i Oppenheimer wystawił mu opinię „najbardziej błyskotliwego młodego fizyka pracującego tutaj”⁷⁹, co wiele mówi, jeśli weźmiemy pod uwagę, że „tutaj” odnosiło się do Narodowego Laboratorium Los Alamos – placówki założonej wyłącznie po to, aby w jednym miejscu mogli pracować najznamenitsi na świecie naukowcy.

Po wojnie Feynman ukończył swój doktorat na Uniwersytecie Cornella, a następnie przyjął profesurę w Caltechu, gdzie starał się pozbyć niesmaku, który pozostał mu po pracy przy bombie atomowej. W następstwie postanowił w swoim życiu skupić się wyłącznie na trzech rzeczach: rozmyślaniu o fizyce, nauczaniu fizyki i opiece nad najzdolniejszymi studentami⁸⁰.

Nauczanie i opieka nad studentami były łatwe. Feynman nosił przezwisko „znakomitego wyjaśniacza”, ponieważ jego wykłady uchodziły za tak dobre, że słuchali ich nie tylko studenci pierwszego roku, lecz także ich starsi koledzy, którzy lepiej rozumieli przedmiot i chcieli zapoznać się z jego podejściem do fizyki. Pozostała jeszcze trzecia rzecz: rozmyślanie. I zdecydował się rozmyślać nad wyzwaniem, które sformułował Dirac.

Jestem w ten sposób rysowany

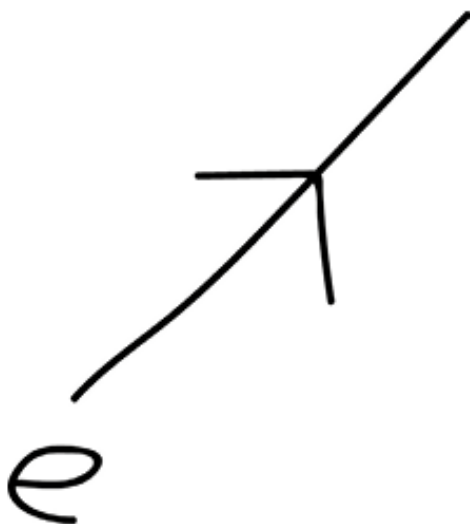
Opracowanie w pełni szczegółowej kwantowej teorii pola dla elektronów i fotonów napotkało duże problemy. Całkiem dosłownie. Wiele obliczeń dawało rozwiązania dążące do nieskończoności lub wymagało nieskończonej liczby danych wejściowych, aby uzyskać rozwiązanie, które oczywiście nie mogło być właściwe dla skończonego wszechświata (zob. dodatek 4, aby poznać nieco więcej szczegółów).

Trudno powiedzieć, co odróżniało Feynmana od innych geniuszy tej samej epoki, ale ja uważam, że sprowadza się to do tego, że najpierw był fizykiem, a potem matematykiem.

Nie chcę wcale umniejszać jego zdolności, był matematycznym wirtuozem jak nikt inny, ale dla niego równania matematyczne były językiem, a nie celem samym w sobie. Trzeba skupić się na tym, co opisują, a nie grzęznąć w symbolice. Ponieważ język matematyczny używany przez wszystkich do rozwiązywania zagadnień QED był uciążliwy i tylko częściowo dawał poprawne rozwiązania, Feynman postanowił wymyślić nowy rodzaj matematyki, aby uprościć życie.

Zaczniemy od wyobrażenia sobie elektronu podróżującego przez Wszechświat i niewtrącającego się w niczyje sprawy. W języku kwantowej teorii pola charakteryzujemy go jako kwant energii rozprzestrzeniający się z jednego miejsca pola elektronowego do drugiego. Opisujemy jego trajektorię za pomocą równania zwanego (dość słusznie) propagatorem.

W nowej matematycznej metodzie Feynmana równanie propagatora elektronu zastępujemy czymś niezbyt skomplikowanym – linią ciągłą ze strzałką:

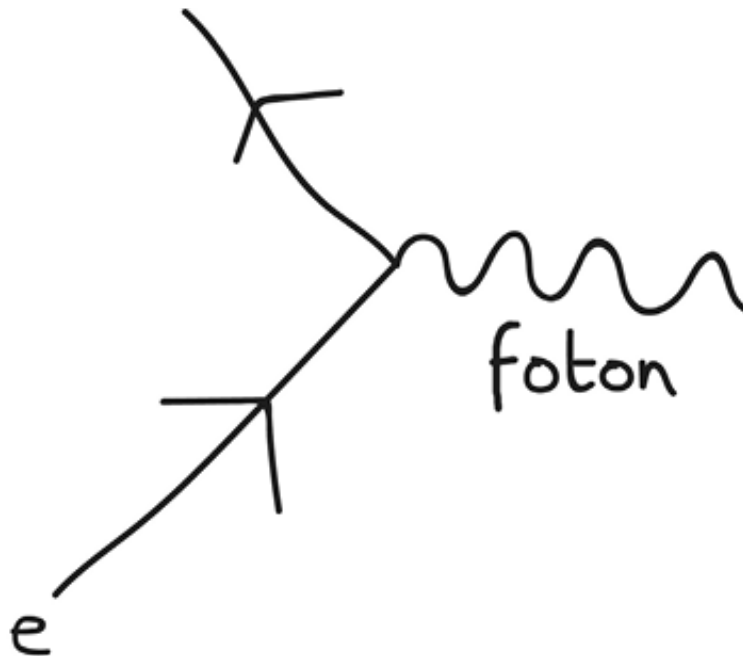


(Uwaga: Ściśle biorąc, symbol ten przedstawia „elektron w ruchu” i nie musi przedstawiać linii prostej z dołu do góry; elektron może się też poruszać po krzywej lub okrążać jądro).

Teraz, gdy elektron porusza się swoim zamierzonym kursem, nadlatuje do niego foton i zostaje wchłonięty, co zmienia kierunek lotu elektronu. W kwantowej teorii pola musimy opisać kwant pola

fotonowego napotykający nasz elektron oraz transfer energii zachodzący pomiędzy tymi dwoma polami.

Propagator fotonu przedstawiamy za pomocą linii falistej i rysujemy oddziaływanie w taki oto sposób:



Odczytując od dołu, widzimy elektron poruszający się w swoim polu, oddziałujący z polem fotonowym (pochłania foton), a następnie pędzący w jakimś nowym kierunku, gdy pochłoniął energię. Równie dobrze może to być opis procesu odwrotnego – elektron emituje foton i ulatuje w innym kierunku, podobnie jak dłoń lecąca do tyłu, gdy następuje wystrzał z pistoletu.

Punkt, w którym te trzy linie się łączą, nazywany jest „wierzchołkiem” diagramu i jest matematycznie związany z czymś, co nazywa się stałą sprzężenia. Stała sprzężenia to tylko liczba, która ilustruje, jak łatwo dwa pola mogą wymieniać się energią. Im wyższa jest ta liczba, tym bardziej prawdopodobne jest oddziaływanie dwóch kwantów (cząstek).

Całość wygląda niezwykle prosto, ale w tym właśnie leży siła metody Feynmana. Diagramy Feynmana zastępują wiele stron obliczeń matematycznych i redukują wszystko do rzeczy

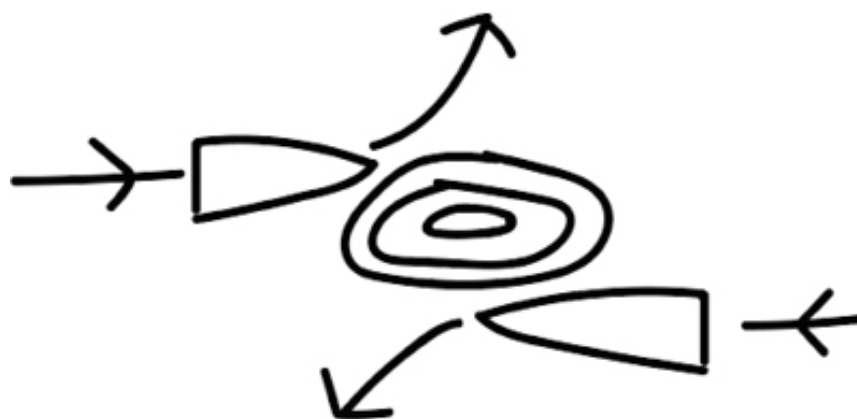
najistotniejszych. Bierzemy propagator elektronu nadlatującego, propagator fotonu, propagator elektronu wychodzącego i stałą sprzężenia, mnożymy je przez siebie i w wyniku otrzymujemy przewidywanie, jak elektron i foton będą oddziaływać ze sobą. To teoria elektrodynamiki kwantowej, która działa.

Ładunek wyjaśniony... w końcu

Zwykła wiązka światła składa się z fotonów spełniających pewne prawa dotyczące kierunku, prędkości i energii. Natomiast jeśli dwa elektrony przechodzą obok siebie, mogą wymienić się fotonem jak piłkarze podający sobie piłkę i z powodu zasady nieokreśloności Heisenberga nie możemy stwierdzić, w którą stronę foton faktycznie się porusza. Można powiedzieć, że zachodzi wymiana fotonów, ale nie da się określić, który elektron odbiera, a który przekazuje: dawałoby to nam zbyt wiele informacji o pędzie i położeniu.

Takie wymiany fotonów zachodzące między elektronami są jak chwilowe zafalowania fotonowe, a nie wiązki światła przechodzące między nimi, najwyraźniej więc nie są to nasze przeciętne fotony.

Wyobraźmy sobie dwie łodzie poruszające się po powierzchni jeziora i mijające się w bliskiej odległości. Gdy to robią, kilwatery każdej z nich spotkają się gdzieś pomiędzy nimi, tworząc tymczasowe zakłócenie wody, które będzie obie wypychać na zewnątrz. Łodzie się nie stykają, ale ta chwilowa fluktuacja w polu wody pozwala im na wymianę energii, co spowoduje odchylenie ich kursów od linii prostej.



Naszkiecowane wyżej łódki (gdy patrzymy z góry na ten diagram) wyobrażają elektrony, a krągłość na wodzie (koncentryczne okręgi pomiędzy nimi) to wymieniany foton, który istnieje tylko przez chwilę, gdy przekazywana jest energia.

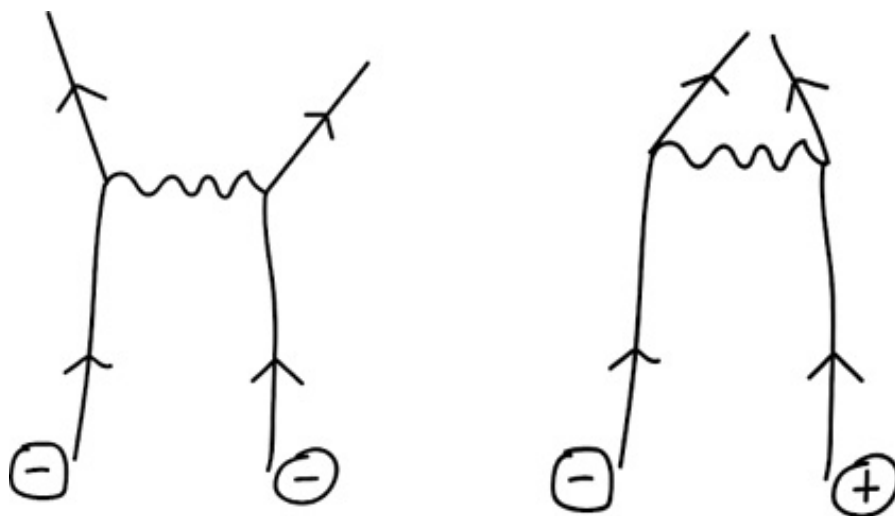
Te chwilowe zafalowania w polu elektromagnetycznym nazywamy „fotonami wirtualnymi”, aby odróżnić je od rzeczywistych, trwałych fotonów, które wchodzi w skład promieni światła. Tak samo można by nazwać fale będącą chwilowym spiętrzeniem wody, która odpycha obie łódzie, ale nie stałą falę, która niezależnie przemieszcza się po oceanie.

Fotony wirtualne nie istnieją długo i nie muszą podlegać normalnym zasadom fizyki, aby więc wyjaśnić jakieś zjawisko, możemy przypisać im pewne własności, których nie miałyby, gdyby ich życie trwało długo.

Foton wirtualny może przenosić energię pomiędzy elektronami, wymuszając ich oddalanie się, ale jeśli cząstki są naładowane przeciwnie, możemy nadać fotonowi wirtualnemu „ujemną energię”, która jak wir zassie cząstki razem⁸¹.

Diagram dla dwóch podobnie naładowanych cząstek odpychających się ukazany jest po lewej stronie, a przyciąganie się cząstek o przeciwnych ładunkach po prawej. Obliczenia odnoszące się do tych diagramów są nieco bardziej złożone, ponieważ musimy uwzględnić dwie stałe sprzężenia (wierzchołki na wykresach) i pięć

propagatorów (dla każdej linii cząstki), ale rozwiązania w ramach QED trafiają w dziesiątkę.



Ładunek elektryczny okazuje się miarą tego, jak silnie cząstka oddziałuje z polem fotonowym i jak zachowują się fotony wirtualne.

Fizyk Julian Schwinger (który otrzymał Nobla wraz z Feynmanem) powiedział, że dlatego właśnie powinniśmy sobie wyobrażać elektron jako nieustannie emitujący i pochłaniający własne fotony wirtualne, jak osoba żonglująca podczas biegu. Dzięki temu podczas jego ruchu wytwarza się wokół niego wirtualna chmura fotonów, na którą mogą wpadać inne cząstki. W ten sposób QED wyjaśnia naturę ładunku elektrycznego.

Łamiąc prawo

Jednym z założeń, na których opieraliśmy się od początku książki, jest to, że przyczyna zawsze prowadzi do skutku, a skutek nie występuje bez przyczyny. Nigdy nie stworzysz czegoś z niczego ani nie sprowadzisz czegoś do niczego. Ta zasada, którą można streścić tak: „energia nie może być tworzona ani niszczone”, ustanowiona została przez Émilie du Châtelet w 1759 roku i jest znana także jako pierwsze prawo termodynamiki. I jest to prawo, które fotonom wirtualnym pozwolono łamać.

Nieokreśloność Heisenberga stwierdza, że nie możemy dokonać precyzyjnych pomiarów cząstki. Pęd i położenie nigdy jednocześnie

nie są ustalone, cząstka nie może więc pozostawać w bezruchu. Kwantowa teoria pola rozszerza tę zasadę i głosi, że to, co jest prawdą dla cząstek, musi być prawdą dla ich pól, co oznacza, że również pole nie może mieć ustalonej wartości.

Pola kwantowe muszą stale drgać, a ponieważ drgania te są cząstkami wirtualnymi, oznacza to, że w każdej sekundzie każde puste pole tworzy i niszczy niezliczone cząstki wirtualne. Każdy punkt przestrzeni wokół ciebie pieni się od cząstek wirtualnych, które w mgnieniu oka powstają i znikają. Pusta przestrzeń nie jest tak naprawdę pusta.

Feynman wyliczył, że energia wszystkich cząstek wirtualnych pojawiających się w objętości równej objętości żarówki będzie wystarczająco duża, aby ugotować wszystkie oceany na Ziemi. Nie odczuwamy tej energii po prostu dlatego, że znika ona równie szybko, jak się pojawia.

Ta wiedza oznacza, że w kwantowej teorii pola można uzyskać coś z niczego, „nic” bowiem jest niestabilne, a zasada nieokreśloności nie pozwala, aby to nic pozostawało w stanie spokoju. Jeśli pustka utrzymuje się wystarczająco długo, energia pojawi się w niej bez przyczyny. Może się to wydawać szaloną sugestią, ale musimy ją przełknąć, ponieważ QED daje coś ważnego w zamian.

To najbardziej dokładna teoria w całej nauce

Feynman nie był jedynym uczonym, który opracował w pełni poprawną kwantową teorię pola elektronów i fotonów. Nagrodę Nobla dzielił z Shin'ichirō Tomonagą i wspomnianym już Julianem Schwingerem, którzy stworzyli własne metody obliczania przewidywań w QED.

Wersje Schwingera i Tomonagi były jednak znacznie bardziej skomplikowane i wymagały dłuższych obliczeń, co – jak wykazał Feynman – nie było konieczne. (Podejścia Feynmana i Schwingera były tak radykalnie odmienne, że nikt nie zdawał sobie sprawy, iż rozwiązują oni ten sam problem, aż do czasu gdy pewnego popołudnia ich wspólny przyjaciel Freeman Dyson, siedząc

w nagrzanym autobusie w drodze do Ithaca, odkrył związek między nimi)⁸².

Diagramy Feynmana są eleganckie, ale Nagrody Nobla nie dostaje się za rysowanie ładnych obrazków. Uwierzcie mi, wysyłałem dziesiątki moich ilustracji książkowych do Komitetu Noblowskiego i nic. QED udało się jednak lepiej, bo diagramy Feynmana to nie tylko fantazyjne szkice. Mają wielką moc przewidywania.

Jej przykładem jest obliczenie wartości siły sprzężenia pól fotonu i elektronu podczas wzajemnego oddziaływania ze sobą (wymiany kwantów pola). Najbardziej dokładne obliczenie tej liczby, które uwzględniało 12 672 diagramy Feynmana mające każdy po dziesięć wierzchołków fotonowo-elektronowych, zostało wykonane w 2012 roku przez Makiko Nio i jego zespół.

Wartość stałej sprzężenia dla tych pól wyniosła 0,00729735256. Wartość zmierzona w eksperymentach wynosi 0,00729735257. Między teorią a pomiarem wystąpiła zgodność do dziesiątego miejsca po przecinku⁸³.

Feynman opisał taki rodzaj zgodności jako odpowiadający pomiarowi odległości między Nowym Jorkiem a Los Angeles i uzyskanie jej z dokładnością grubości ludzkiego włosa. W nauce żadne inne przewidywanie nie było tak zadziwiająco zgodne z eksperymentem.

Jeśli mamy zaakceptować jakąkolwiek teorię naukową, poczynając od tego, co powoduje, że ciepłe powietrze się unosi, a kończąc na wyjaśnieniu, jak działają wirusy, to powinniśmy przede wszystkim zaakceptować QED, ponieważ daje ona najbardziej dokładne wyniki. A jeśli liczby nie są przekonujące, to mamy jeszcze jedno przewidywanie QED dotyczące materii. Albo raczej antymaterii.

Brzmi jak z filmu wzięte

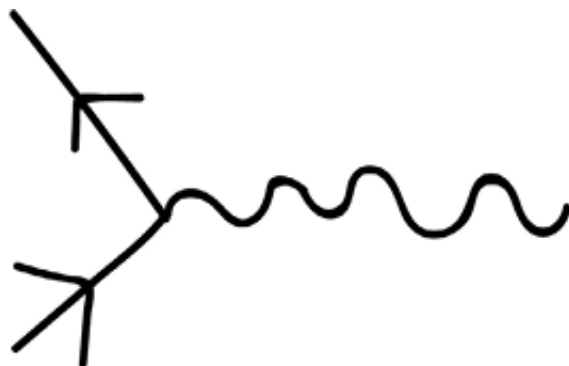
Kiedy Dirac mówił o cząstkach wynurzających się z pola, zwracał uwagę na to, że w polu powinny one po sobie pozostawiać dziurę. Przywołajmy analogię do lodów: każda gałka, którą wycinamy

z masy lodowej, tworzy w jej powierzchni wgłębienie równej wielkości.

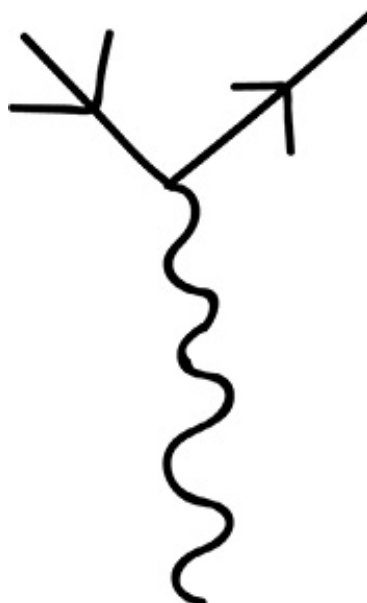
Możemy to zniwelować, umieszczając tam z powrotem cząstkę, ale wygląda na to, że jej wytworzenie powoduje jednocześnie pojawienie się w polu cząstki-dziury. Antycząstki.

QED Feynmana również przewiduje antycząstki, ale powstają one w inny sposób. Zamiast jednego pola elektronowego, z którego tworzymy elektron i dziurę, istnieją dwa pola: jedno elektronowe i jedno antyelektronowe, oraz pole fotonowe, które je łączy.

Powróćmy do diagramu Feynmana dla elektronu absorbującego (lub emitującego) foton.

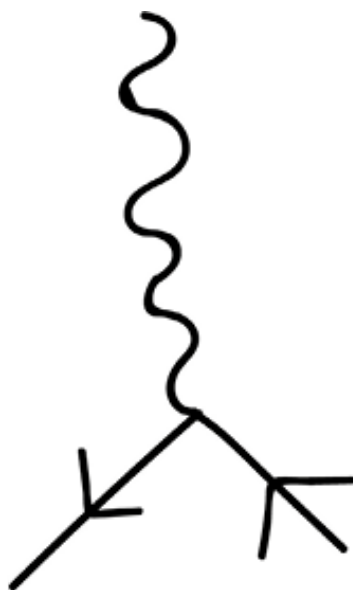


Jedną ze zmyślnych cech diagramów Feynmana jest to, że można je rysować pod dowolnym kątem, co oznacza, że możemy je obracać i uzyskiwać równie poprawne rozwiązania. Jeśli obrócimy powyższy diagram o kąt prosty, to otrzymamy...



Odczytując od dołu do góry, otrzymujemy kwant pola fotonowego poruszający się w przestrzeni, który losowo znika, przenosząc swoją energię w pole elektronowe (foton zamienia się w elektron). Jeśli zaś przyjrzymy się bliżej, widzimy coś dziwnego. Jeden z elektronów ma swoją strzałkę propagatora skierowaną wstecz.

Propagator po prawej stronie wyobraża elektron, ale cząstka po lewej stronie musi być pewnym rodzajem odwróconego elektronu pojawiającego się w tym samym czasie. I możemy odwrócić całość jeszcze raz...



Dwie linie ze strzałkami pokazują teraz elektron (po prawej) i antyelektron (po lewej) zbliżające się ku sobie i anihilujące w celu wytworzenia fotonu. (Nawiasem mówiąc: ze względów matematycznych zderzenie w istocie stwarza dwa fotony, a nie jeden, ale tutaj nie ma to żadnego znaczenia)⁸⁴.

Wydaje mi się, że słyszę, jak pytasz: „A jaki miałby być ten antyelektron?”. Otóż taki jak normalny elektron, ale z odwróconym ładunkiem. Taki elektron dodatni, a nie ujemny. Jeśli jednak elektron otrzymuje swój ładunek dzięki żonglowaniu fotonami w jednym kierunku, to czy przeciwny ładunek jest wynikiem żonglowania fotonami odwrotnie? Feynman zagadkowo odpowiedział – tak.

W 1949 roku wykazał, że jeśli wziąć propagator normalnego elektronu i odwrócić kierunek czasu w równaniu (odwrócić strzałkę na diagramie), to otrzyma się propagator antyelektronu. Antycząstki to, według Feynmana, regularne cząstki poruszające się w czasie wstecz⁸⁵.

Ta koncepcja ruchu elektronu w czasie wstecz jest krytykowana zawzięcie przez niektórych współczesnych fizyków, ponieważ nie można poważnie twierdzić, że elektron może odbywać podróże w czasie. Dla mnie wygląda to trochę jak sprzeciw Einsteina wobec stanu superpozycji. Nie podobało mu się to, co on sugerował, ale nie można było ustalić, czy ów stan jest poprawny, czy błędny; wszystko, co można było powiedzieć, to to, że równania są poprawne. To, co to oznacza, jest kwestią gustu. Cząstki antymaterii istnieją i zachowują się właśnie tak, jak stwierdził Feynman.

Zbuduj sobie własny detektor cząstek

Antymateria została odkryta przez Carla Andersona za pomocą urządzenia zwanego komorą kondensacyjną. Konstrukcja jest tak prosta, że każdy może ją zbudować. Zrobiłem ich już kilka, mimo że jestem tak samo bezużyteczny w laboratorium jak Heisenberg, chociaż wiem, jak wymienić baterię w czujniku dymu (co zabawne, czujnik dymu jest niezbędny w każdym laboratorium, w którym pracuję).

Oto jak to zbudować. Zdobądź przezroczysty zbiornik i obwiń jego krawędź dookoła paskiem filcu nasączonym alkoholem (najlepszy jest izopropanol/alkohol etylowy). Uszczelnij go i połóż całość na warstwie lodu, aby schłodzić dolną powierzchnię. W ten sposób wewnątrz zbiornika powstanie rozrzedzona chmura oparu alkoholu, a wszelkie cząstki, które przelecą przez plastikowe ścianki, pozostawią po sobie bladą smugę kondensacyjną, pojawiającą się pozornie znikąd.

Możesz również umieścić wewnątrz magnes i naładowane cząstki będą poruszać się po zakrzywionym wokół niego torze – ładunek i magnetyzm są cechami charakterystycznymi tego samego pola.

Carl Anderson badał promieniowanie kosmiczne – cząstki, które nieustannie docierają do nas z kosmosu – i liczył elektrony osiagające powierzchnię planety. Kiedy robił pomiary, większość z nich zachowywała się właśnie tak, jak się spodziewano, ale 15 śladów wokół magnesu skierowanych było w niewłaściwą stronę. Anderson obserwował dodatnio naładowane elektrony. Antymaterię pochodzącą z kosmosu⁸⁶.

Antyelektrony zostały nazwane „pozytonami”. Jednak odwrotnie naładowany proton wbrew oczekiwaniom nazwano antyprotonem, natomiast antycząstkę neutronu – antyneutronem, choć można się zastanawiać, jak to jest możliwe, by neutron mógł mieć odwrotny ładunek, skoro jest słynną cząstką neutralną. Wyjaśnimy to w następnym rozdziale.

Dzięki QED obraz rzeczywistości stał się o wiele bardziej skomplikowany, ponieważ mamy już do czynienia z siedmioma cząstkami/polami: protonami, antyprotonami, neutronami, antyneutronami, elektronami, pozytonami i fotonami.

Fotony nie mają odpowiedników w antymaterii, co jest zgodne z odwróceniem upływu czasu w podejściu Feynmana. Jeśli antymateria naprawdę jest regularną materią w czasie płynącym wstecz, to fotony powinny być własnymi antycząstkami, ponieważ nie doświadczają upływu czasu.

Jak już dowiedzieliśmy się ze szczególnej teorii względności, czas zwalnia wraz ze zwiększaniem prędkości, aż do uniwersalnej granicy, gdy ustaje jego wpływ, a ponieważ fotony poruszają się z tą

graniczną prędkością, dla nich upływ czasu nie istnieje. Fotony nie starzeją się w czasie płynącym do przodu, co oznacza, że nie starzeją się również w czasie płynącym wstecz.

Broń z wyboru dla złoczyńców z komiksu

Cząsteczki antymaterii mają krótki oczekiwany czas życia, ponieważ gdy tylko napotkają materię regularną (stanowiącą większość Wszechświata), anihilują, wytwarzając fotony. Jednak nie martw się, możesz stworzyć własne cząstki antymaterii tutaj na Ziemi za jakże niską cenę 62 bilionów dolarów za gram!⁸⁷

Oczywiście, ponieważ antymateria jest tak kosztowna i trudna do wytworzenia, jest produkowana tylko w niewielkich ilościach przez fizyków cząstek charakteryzujących się dużą cierpliwością. W czasie pisania tej książki rekord utrzymania przy życiu największej porcji antymaterii został osiągnięty w 2011 roku⁸⁸ i wynosił gigantyczne szesnaście i pół minuty dla 309 atomów antywodoru (antyproton z orbitującym wokół niego pozytonem).

Głównym powodem, dla którego warto przyjrzeć się zastosowaniu antymaterii w technologii, jest to, że energia, którą otrzymujemy w wyniku anihilacji materii z antymaterią, jest tak wielka, iż materiał tego typu mieszczący się na łyżeczce od herbaty mógłby być źródłem mocy dla rakiety wysłanej w kierunku Alfry Centauri. Mógłby przyspieszyć statek kosmiczny średniej wielkości do około jednej czwartej prędkości światła, co pozwoliłoby na odbycie podróży w ciągu kilku lat, a nie wieków.

Ten rodzaj energii jest oczywiście doskonały jako broń, a temat bomb zbudowanych z antymaterii był od czasu do czasu poruszany przez wojskowych. Zależnie od tego, jak ją wykorzystamy, antymateria może stać się najbardziej niszczycielską siłą na naszej planecie lub sposobem ucieczki z niej.

⁷⁷ Ch. Sykes, *No Ordinary Genius*, W.W. Norton & Company, Londyn 1994.

⁷⁸ J. Gleick, *Geniusz: życie i nauka Richarda Feynmana*, przeł. P. Amsterdamski, Zysk i S-ka Wydawnictwo, Poznań, 1999.

- [79](#) List Roberta Oppenheimera do Roberta Birge'a z 4 listopada 1943.
- [80](#) R.P. Feynman, R. Leighton, *„Pan raczy żartować, panie Feynman!": przypadki ciekawego człowieka*, przeł. T. Bieroń, Wydawnictwo Znak, Kraków 2007.
- [81](#) A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell*, Princeton University Press, Princeton 2010.
- [82](#) Ch. Sykes, op. cit.
- [83](#) M. Nio i in., *Complete Tenth-order QED Contribution to the Muon $g-2$* (2012), dostępne na <https://arxiv.org/abs/1205.5370> (dostęp 15 grudnia 2018 r.).
- [84](#) T. Lancaster, S. Blundell, *Quantum Field Theory for the Gifted Amateur*, Oxford University Press, Oksford 2015.
- [85](#) R.P. Feynman, *The Theory of Positrons*, „Physical Review” 1949, t. 76.
- [86](#) C.D. Anderson, *The Positive Electron*, „Physical Review” 1933, t. 43.
- [87](#) D. Dooling, *Reaching for the Stars*, „Science at NASA” (12 kwietnia 1999 r.), dostępne na: https://science.nasa.gov/science-news/science-atnasa/1999/prop12apr99_1 (dostęp 15 grudnia 2018 r.).
- [88](#) W. Bertsche i in., *Confinement of Antihydrogen for 1,000 seconds*, „Nature Physics” 2011, t. 7, nr 7, s. 558–564.

Rozdział 13

Fizyce cząstek przybywa muskulatury

Nieproszony gość

Jest 1936 rok. Struktura atomowa została określona, a kwantowa teoria pola daje dokładne przewidywania. Ostatni raz byliśmy tak pewni swego tuż przed podjęciem przez Maxa Plancka eksperymentów z żarówkami i oczywiście to nie mogło się powtórzyć. Bo co innego może się jeszcze zdarzyć?

Cóż, jak ujmuje to często cytowany wiersz Robbiego Burnsa: „nawet najlepiej obmyślane plany myszy i ludzi nie uwzględniają obecności pola mionowego”.

Carl Anderson odkrył antymaterię, obserwując w komorze kondensacyjnej tory lotu pozytonów. To niesamowite osiągnięcie, ale nikogo nie rzuciło na kolana, ponieważ odkrycie antymaterii było oczekiwane na podstawie obliczeń w ramach QED. Natomiast w 1936 roku wszystkich rzucił na kolana kolejny ślad zauważony w komorze kondensacyjnej, ślad, który sugerował obecność elektronu... tyle że 200 razy cięższego.

Cząstka ta, ochrzczona jako mion, ma te same charakterystyki co elektron. Sprzęga się z polem fotonowym i postępuje zgodnie z regułami diagramu Feynmana. Jest jednak po prostu gruba i o ile wiadomo, zupełnie niepotrzebna do poprawnego działania teorii.

Żaden atom nie zawiera mionów, ponieważ są to cząstki krótkotrwałe, żyjące około dwóch milionowych części sekundy, są one więc obecne we Wszechświecie, ale nie mają żadnego

widocznego celu, co skłoniło zdumionego laureata Nagrody Nobla Isidora Isaaca Rabiego do wrzaśnięcia: „Kto to zamawiał?!” – gdy powiedziano mu, że istnieje nowe pole, którego żadna teoria nie przewidywała ani nie potrzebowała⁸⁹.

Ponieważ miony są tak ciężkie, mają też dużą energię i podobnie jak struna gitary, zmniejszając amplitudę drgań, wytwarza cichszy dźwięk, fluktuacje w polu mionowym szybko przenoszą energię do pola elektronowego, co powoduje rozpad cięższej cząstki na lżejszą (wyszukany sposób powiedzenia, że miony zamieniają się w elektrony).

W 1974 roku stało się podobnie, kiedy Martin Perl odkrył taon (często nazywany po prostu tau), jeszcze cięższy elektron, tym razem trzy i pół tysiąca razy cięższy i mający jeszcze krótszy czas życia⁹⁰.

Okazało się, że elektrony i pozytony nie są jedyne. Były one najlżejszymi z członków rodziny cząstek składającej się z elektronów, mionów, taonów i ich bliźniaków z antymaterii. Zbiór tych sześciu cząstek nazwano „leptonami” od greckiego słowa *leptos*, czyli małe, a ich istnienie jest nieco intrygujące.

Był taki czas, kiedy wyobrażano sobie, że każde prawo fizyki w jakiś sposób przyczynia się do powstania życia i musi mu sprzyjać. Odkrycie mionu i taonu stanowi wyzwanie dla tego poglądu, ponieważ wydaje się, że natura czasem robi rzeczy, które nie mają z nami nic wspólnego. Życie istnieje doskonale bez mionów i taonów. Bez względu na to, czemu ma służyć ich istnienie, my najwyraźniej ich nie potrzebujemy.

Miony i taony mają kilka ezoterycznych zastosowań, takich jak badanie wnętrza piramid (są cięższe i penetrują głębiej niż wiązka elektronów), ale poza tym wydaje się, że natura bez powodu potroiła elektron. I nie skończyła na leptonach.

Zoologia cząstek

Cząstki promieniowania kosmicznego są trudne do wykrycia, ponieważ większość z nich oddziałuje z atmosferą i nigdy nie dociera

do powierzchni Ziemi. Aby uzyskać lepsze wyniki, Cecil Powell postanowił umieścić kilka detektorów cząsteczek na szczycie Andów i sprawdzić, co dolatuje na dół. W 1947 roku na tej wielkiej wysokości zaobserwował cząstkę, którą nazwał pionem i która miała taki sam ładunek jak neutron, ale mniejszą masę.

Kilka miesięcy później Clifford Butler odkrył w podobny sposób cząstkę zwaną kaonem. Następnie w 1950 roku zidentyfikowano cząstkę lambda, która zachowywała się jak ciężki proton. Następnie odkryto cząstki ksi, cząstki eta i cząstki omega. Na początku lat sześćdziesiątych XX wieku pojawiło się ponad czterysta nowych cząstek, z którymi należało być na bieżąco⁹¹.

Ta zgrabna kolekcja wydawała się czymś w rodzaju przyjęcia, na którym co pięć minut pojawiał się nieproszony gość. Robert Oppenheimer zauważył, że powinno się przyznawać Nagrodę Nobla tym fizykom, którym *nie* udało się odkryć nowej cząstki⁹², a Enrico Fermi wyraził swoją frustrację, mówiąc: „gdybym potrafił zapamiętać te wszystkie nazwy, to zostałbym botanikiem!”⁹³.

Kwantowa teoria pola miała być eleganckim, choć skomplikowanym matematycznie opisem podstawowych praw fizyki. Natomiast ta okropna mikstura cząstek nie przedstawiała takiego obrazu.

Przypominał on raczej to, co działo się w chemii sto lat wcześniej. Odkrywano nowe pierwiastki chemiczne o różnych właściwościach, a zamieszanie uporządkowano dopiero wtedy, gdy uświadomiono sobie, że atomy składają się z mniejszych cząstek – protonów, neutronów i elektronów, dziś nam dobrze znanych. Fizycy zaczęli mieć nadzieję, że coś podobnego stanie się z cząstkami.

Czterysta różnych gatunków w zoo wydawało się zbyt ogromnym nieporządkiem. Ktoś musiał odnaleźć jakiś wzorzec w tym chaosie, sposób, w jaki Feynman zaprowadził porządek w rozumieniu oddziaływania elektronów i fotonów. Badaczem, który ogarnął to monumentalne zadanie, był – jak chciał traf, a może ironia historii – rywal Feynmana, Murray Gell-Mann.

Między Gell-Mannem i Feynmanem często pojawiało się napięcie, być może pogłębiało je to, że obaj byli noblistami. A ich gabinety znajdowały się po przeciwnej stronie korytarza.

Feynman był imprezowiczem lubiącym towarzystwo kobiet (żenił się trzy razy) i rzadko czytał książki. Gell-Mann, wybitny uczony, który zaczął studia w Yale w wieku piętnastu lat, mówił wieloma językami i spędzał czas, czytając prace z zakresu językoznawstwa i archeologii. Gell-Mann wybrał spokojne życie, a Feynman lubił przebywać w barach i klubach (choć należy zauważyć, że nigdy nie pił alkoholu i zachęcał do trzeźwości).

Pomimo nieporozumień i różnych stylów życia obaj podejrzewali, że protony i neutrony wcale nie są cząstkami podstawowymi. Istniało wiele znanych lżejszych cząstek, co oznaczało, że struktura mikroświata musi być bardziej subtelna. Rozpoczął się zatem wyścig o to, kto wymyśli nową kwantową teorię pola, która ją opisze.

Feynman nazwał owe hipotetyczne subprotony/neutrony „partonami” i teoretycznie opracowywał metody ich obserwacji. Jednak teorię szczegółowo je opisującą opracował Gell-Mann, który ochrzcił je mianem *kworków*, ponieważ podobało mu się brzmienie tego słowa (jeśli kiedyś już czytaliście o tym i nie jesteście pewni, czy moja pisownia jest poprawna – poczekajcie).

Analizując masy, ładunki, spiny i czasy życia odkrytych cząstek, Gell-Mann wykazał, że wszystkie można otrzymać jako kombinacje *kworków*, które występowały w dwóch odmianach, nazwanych przez niego górnymi i dolnymi.

Górne *kworki* mają ładunek dodatni $+\frac{2}{3}$, natomiast dolne – ładunek ujemny $-\frac{1}{3}$. Jeśli połączysz dwa górne z dolnym, dostajesz $+\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3}$, co w sumie wynosi $+1$..., czyli mamy proton. Jeśli natomiast połączysz dwa dolne *kworki* z jednym górnym, otrzymujesz $-\frac{1}{3} - \frac{1}{3} + \frac{2}{3}$, co w sumie się zeruje, czyli dostajemy neutron.

Trzy górne *kworki* stają się cząstką zwaną delta. Jeden górny *kwork* z jednym dolnym *kworkiem* antymaterii staje się pionem i tak dalej. Zoologia cząstek stała się iluzją, a protony i neutrony okazały się cząstkami złożonymi, a nie podstawowymi. W tym momencie to *kworki* miały znaczenie, ponieważ to im przypadła rola podstawowych cegiełek materii.

A tak przy okazji, oto jak można uzyskać antyneutrony. Podczas gdy zwykły neutron jest pozbawiony ładunku, jego składowe *kworki*

już nie są. Dwa antydolne *kworki* z jednym antygórnym dają w sumie ładunek zero, ale zero antymaterii, a nie materii. Czy życie nie jest doskonałe?

Krzyk mewy

Pewnego wieczoru Gell-Mann czytając powieść *Finneganów tren* autorstwa irlandzkiego modernisty Jamesa Joyce'a, natknął się na wiersz, w którym występowała fraza: „Niech kwarki trzy ma Mark!”⁹⁴.

Natychmiast wpadło mu w ucho to nonsensowne słowo „kwark”, ponieważ opisywało ono coś, co zachodziło w grupie złożonej z trzech obiektów, tak jak często robiły proponowane przez niego cząstki. Pisownia jakby oddawała dźwięk, który wybrał, i od tej pory ją stosował. Joyce prawdopodobnie użył słowa „kwark” by uzyskać rym do imienia Mark, ale Gell-Mann zdecydował, że powinno ono rymować się z kwarcem⁹⁵.

W wierszu słowo to naśladuje krzyk mewy, ale mewy z Kalifornii, gdzie mieszkał Gell-Mann, najprawdopodobniej wydają odgłos przypominający „*kwork*”, a nie „kwark”.

W Wielkiej Brytanii ludzie zazwyczaj wymawiają to słowo jako „kwark”, ale nie tego chciał Gell-Mann. Musisz wymawiać to jako *kwork* lub narazić się na gniew kalifornijskich mew.

Nawiasem mówiąc, ukucie dla cząstki nazwy naśladującej odgłos ptaka nie jest najdziwniejszą rzeczą w fizyce. Alan Guth nazwał swą hipotetyczną cząstkę inflatonem w związku z jej rzekomą zdolnością do inflacji Wszechświata, natomiast Frank Wilczek nadał swojej cząstce nazwę aksjon od marki proszku do prania⁹⁶.

Kolorowy język

Kilka lat po zgłoszeniu przez Gell-Manna postulatu istnienia kwarków zostały one odkryte eksperymentalnie w procesie, w którym wystrzeliwuje się leptony (elektrony, miony i taony) w neutron i obserwuje ich trajektorie. Gdyby neutron był pojedynczym kawałkiem materii w „polu neutronowym”, elektrony doznawałyby

odrztu pod ostrym kątem, ale gdyby miał on strukturę utworzoną z kwarków, jak przewidywał Gell-Mann, trajektorie leptonów zostałyby tylko zakrzywione przez częściowe ładunki kwarków⁹⁷.

Wyniki powyższych eksperymentów, zgodne z przewidywaniami Gell-Manna, ujawniły w tym procesie nowy typ cząstki i nową kwantową teorię pola opisującą jądro atomowe.

Protony i neutrony składają się z trzech kwarków plus tysięcy kwarków wirtualnych pojawiających się wokół nich dzięki nieokreśloności Heisenberga. Te trzy kwarki, które pozostają na stałe, nazywane są „kwarkami walencyjnymi” i to one określają tożsamość całości.

Wiemy, że kwarki oddziałują z polem fotonowym, ponieważ mają ładunek elektryczny, ale oczywiście można zapytać, dlaczego dwa kwarki górne, oba dodatnie, się nie odpychają. Dwie podobnie naładowane cząstki nigdy nie pozostaną razem, ktoś więc musiał wyjaśnić, dlaczego każde jądro atomowe nie rozpada się na kawałki już w momencie formowania.

Japoński fizyk Hideki Yukawa zaproponował oddziaływanie znacznie silniejsze niż elektromagnetyzm, które utrzymuje protony w jednym kawałku, a także razem protony i neutrony. Oddziaływanie to, ponieważ było silne, mogło przeważać odpychanie się ładunków, dlatego też nazwał je (przygotuj się na to) oddziaływaniem silnym.

Różnica wielkości oddziaływania elektromagnetycznego i silnego jest dość duża. Oddziaływanie elektromagnetyczne to ten rodzaj, który utrzymuje elektrony w ruchu wokół atomów i wywołuje reakcje chemiczne, na przykład pożary. Energie związane z oddziaływaniem silnym poruszają protony i neutrony w rdzeniu jądra atomowego. To one są odpowiedzialne za inicjowanie wybuchu jądrowego.

Ponieważ oddziaływanie elektromagnetyczne odpowiada za sprzęganie cząstek z polem fotonowym i komunikowanie się za pomocą wirtualnych fotonów, to, logicznie rzecz biorąc, oddziaływanie silne powinno mieć własne pole i swoje kwanty w postaci kwarków. Gell-Mann nazwał je polem gluonowym. No wiesz, bo ono to skleja⁹⁸.

Następnie aby posunąć się do przodu, potrzebujemy pewnej własności. Zdolność cząstki do sprzęgania się z polem fotonowym

nazywana jest jej ładunkiem elektrycznym. Gell-Mann musiał jakoś nazwać tę własność, która umożliwiałaby kwarkom sprzęganie się z polem gluonowym, i wybrał mało pomocne słowo – kolor.

Kleistość może się wydawać bardziej intuicyjną nazwą, ale Gell-Mann miał ku temu powód. W przeciwieństwie do ładunków elektrycznych, które występują w dwóch odmianach (dodatniej i ujemnej), kolor występuje w trzech, przypominających trzy podstawowe barwy światła.

Kwarki z czerwonym, zielonym i niebieskim „kolorem” wiążą się ze sobą za pomocą gluonów, a kolory znoszą się, tworząc „biały” proton lub neutron. Kwarki nie są dosłownie czerwone, niebieskie lub zielone (w rzeczywistości nie mają koloru – zob. dodatek 5), ale zazwyczaj rysujemy je w ten sposób, aby rzecz możliwie maksymalnie zagmatwać.

Feynmanowska kwantowa teoria pola elektronów i fotonów była elektrodynamiką kwantową, Gell-Mann więc nazwał swoją teorię kwarków i gluonów chromodynamiką kwantową (w skrócie QCD), od greckiego słowa *chroma* oznaczającego kolor.

Wygląda na to, że utknęliśmy na tej drodze

Pomiędzy teorią QED Feynmana dla leptonów a teorią QCD Gell-Manna dla kwarków występuje wielka różnica polegająca na tym, że w QED wszystko można opisać w kategoriach przeciwieństw. Przyciąganie i odpychanie, pozytywne i negatywne, materia i antymateria itd. Ze wszystkim tym można sobie poradzić przez odwracanie pewnych pozycji w równaniach i na diagramach, ale z oddziaływaniem silnym związane są trzy kolory, nie jest to już więc kwestia włączenia biegu wstecznego. Gdy występują trzy odmiany, słowo „przeciwstawne” traci tu zastosowanie.

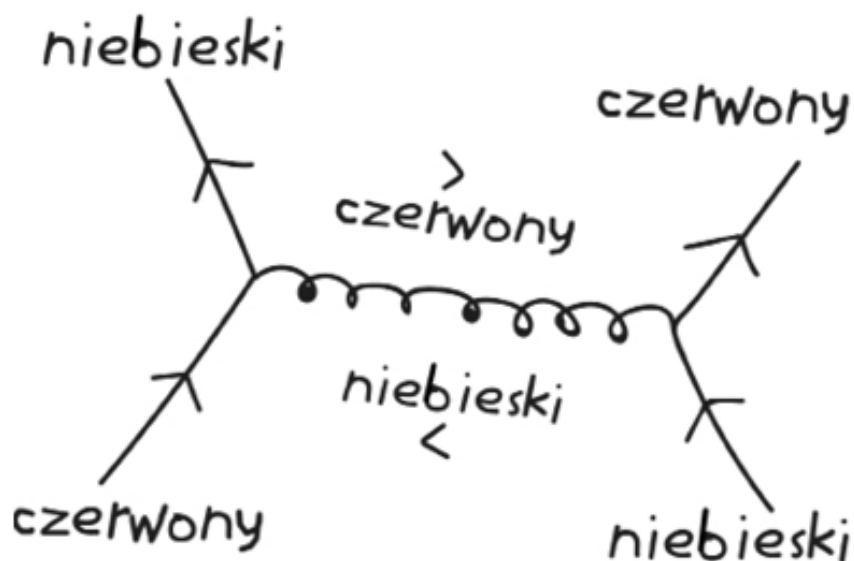
Ponadto kwarki antymaterii mają antykolory noszące nazwy: antyczerwony, antyniebieski i antyzielony, zatem naprawdę istnieje sześć ładunków kolorowych, które musimy wyjaśnić, aby QCD miała sens. Oba ładunki elektryczne są wynikiem żonglowania fotonami

w sposób przeciwny, ale gluony są inne i to właśnie ich dziwaczne zachowanie Gell-Mann musiał uzasadnić.

Potrzebny był bardziej skomplikowany typ diagramu Feynmana, w którym kolor może być przenoszony.

Elektrony i pozytony utrzymują swój ładunek elektryczny, ale kwarki mogą zamieniać kolor między sobą tam i z powrotem. Jeśli mamy dwa kwarki, powiedzmy czerwony i niebieski, to pole gluonowe może wymieniać ich kolory, tak więc czerwony staje się niebieskim, a niebieski czerwonym.

Na diagramach QCD używa się linii spiralnych do przedstawiania gluonów, a oddziaływanie pomiędzy dwoma kwarkami można obliczyć/narysować w ten sposób:



Gluon, który porusza się między nimi, przenosi niebieski ładunek na lewo i czerwony ładunek na prawo, co oznacza, że gluony wirtualne są wielobarwne, podczas gdy kursują wahadłowo tam i z powrotem.

Ta wymiana kolorów wyjaśnia również, dlaczego oddziaływanie silne jest zawsze przyciągające, a elektromagnetyzm może zarówno przyciągać, jak i odpychać. Ponieważ gluony wirtualne są wielobarwne, na każdym końcu zawsze musi znajdować się kwark. Gluony z definicji przenoszą kolor z jednego kwarka na drugi, jeśli

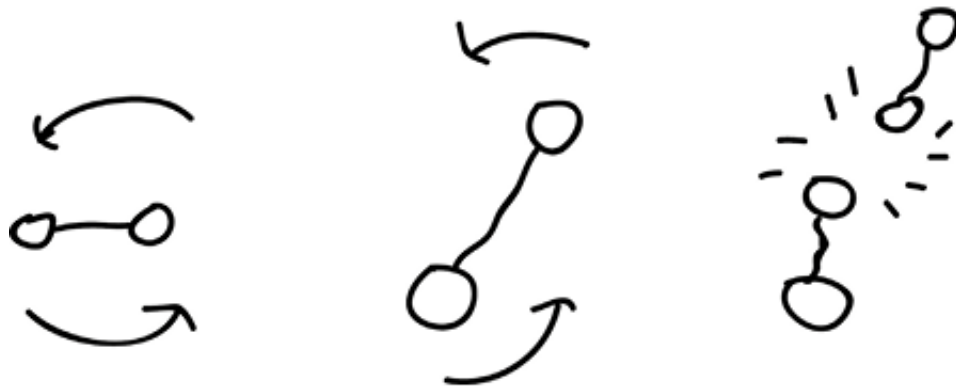
więc usuniemy jeden z kwarków, to gluon pozostanie z pewnym ładunkiem kolorowym i nigdzie nie będzie można go umieścić.

Kwarki mają kolor, co jest odmiennym sposobem wyrażenia tego, że sprzęgają się z polami gluonowymi, i dlatego nigdy nie istnieją samodzielnie, ponieważ częścią ich tożsamości jest „wiązanie się z innymi kwarkami przez gluony”. Oddziaływanie silne jest zawsze przyciągające.

Opisujemy to terminem „uwięzienie kwarków”. Kwarki występują zawsze dwójkami (mezony), trójkami (bariony), czwórkami (tetrakwarki) i tak dalej. Nigdy nie obserwujemy kwarków „nagich” – to prawdziwe określenie – chociaż fizycy, z lekką zboczeni, usilnie starają się choćby na moment to zobaczyć.

Mając dwa kwarki na końcach nici gluonowej (mezon), możemy nią kręcić w polu magnetycznym, aż tuba gluonowa pęknie.

Niestety, kiedy przeprowadzamy ten eksperyment, gluony uzyskują nadmierną energię i natychmiast przenoszą ją do pola kwarkowego, tworząc nowe kwarki na każdym końcu rozdarcia. Z jednego mezonu powstają dwa. Kwarki nie istnieją samodzielnie, nawet jeśli próbujemy je rozerwać.



W QED Feynmana fotony nie mają ładunku (one go tworzą), ale w QCD Gell-Manna gluony *mają* kolor, tak jak ich kwarki, co oznacza, że gluony oddziałują same z sobą, zamieniając do woli kwantowe tęcze tam i z powrotem.

Początkowo miało sens założenie, że proton składa się z trzech kwarków i gluonów poruszających się między nimi po torze

w kształcie trójkąta, ale ponieważ gluony oddziałują ze sobą i trzymają się razem, przyjmuje się, że rury gluonowe pomiędzy kwarkami tworzą kształt litery Y.



Oznacza to również, że gluony mogą sklejać się ze sobą (i wcale nie potrzebują do tego kwarków), tworząc własne splecione gluonowo-gluonowe struktury o kształcie ptasiego gniazda zwane kulami gluonowymi.

Pod pewnymi względami wszystkie te dodatkowe komplikacje sprawiają, że QCD jest bardziej imponującą i bardziej zawiłą teorią niż ta Feynmana. Z kolei QED jest znacznie bardziej elegancka, wymaga bowiem tylko jednej cząstki wymiany, podczas gdy QCD potrzebuje ich kilku (osiem rodzajów gluonów do wymiany wszystkich kombinacji kolorów). Dzięki Bogu istnieją tylko dwa rodzaje kwarków. Prawda?

Dziwnie powabny

Kwarki dolne i górne Gell-Manna są świetne. Łącząc je w odpowiednim porządku, możemy wyjaśnić własności prawie wszystkich cząstek znanych nam z owego zoo. Kluczowym słowem jest tu „prawie”.

Szczególnie jednej cząstki, kaonu, nie da się opisać jako połączenia kwarków dolnego i górnego. Wydaje się, że jest ona kwarkiem górnym sklejonym z cięższą wersją kwarka dolnego.

Ponieważ wiadomo było, że elektrony mają bardziej masywne kopie (mion i taon), Gell-Mann zdecydował, że kwark dolny musi mieć to samo. Zachowanie kaonów było niezaprzeczalnie dziwne, Gell-Mann więc użył tego słowa do nazwania trzeciego kwarka, dając nam zestaw wszystkich wymaganych w QCD kwarków:

Kwark górny	
Kwark dolny	Kwark dziwny

No, nie. Spójrzcie na to.

Gell-Man posłużył się skomplikowaną matematyką do przewidzenia kwarka dolnego i górnego, ale nie potrzeba noblisty, żeby zobaczyć, że czegoś tam brakuje. Jeśli kwark dolny ma cięższego partnera, to czy nie wydaje się prawdopodobne, że kwark górny też powinien takiego mieć? Czy teoria nie byłaby o wiele schludniejsza i ładniejsza, gdyby znalazł się ten czwarty?

Fizyk Sheldon Glashow wierzył w ten czwarty rodzaj kwarka i ustalił, jakie powinien mieć on własności. Było kilka dowodów sugerujących jego istnienie (spodziewano się, że cząstki zwane K^+ i K^0 przekształcają się w lżejsze cząstki, ale do tego nie doszło, chociaż według teorii Gell-Manna z trzema kwarkami proces ów powinien zajść), lecz Glashow w dużej mierze opierał się na instynktownym poczuciu, że Wszechświat powinien być piękny.

Uczeni przeważnie są pragmatycznymi sceptykami, nieprzyjmującymi żadnej idei bez dowodów, ale czasami wykazują ludzkie cechy i miewają nadzieje.

Glashow wierzył w głębokie piękno natury i nazwał swoją cząstkę kwarkiem powabnym, ponieważ jego powabna natura kompletuje symetrię kwarków. Jego optymizm został nagrodzony odkryciem tego kwarka w 1974 roku. To dowodzi, że w fizyce czasami można mieć nadzieję, iż natura wie, co robi.

Trzy to magiczna liczba... jak widać

W arcydziele literatury fantastycznonaukowej Arthura C. Clarke'a *Spotkanie z Ramą* (1973) ludzkość odkrywa porzuconą obcą strukturę stworzoną przez gatunek mający obsesję na punkcie liczby trzy. Znajdowane są garnitury obcych o trzech kończynach, struktury zbudowane potrójnie, ponadto wydaje się, że każda decyzja, jaka została podjęta przez tajemniczy gatunek, jest trzykrotnie kopiowana. Natura ma podobną obsesję.

Na rok przed potwierdzeniem istnienia kwarka powabnego i w tym samym roku, w którym ukazało się *Spotkanie z Ramą*, Makoto Kobayashi uczynił następny krok w sprawie symetrii. QED miała trzy cząstki materii – elektrony, miony i taony – być może więc podobny trend powinien zostać powtórzony w QCD.

Cieęższym bratem kwarka górnego był kwark powabny, a kwarka dolnego – kwark dziwny. Czy może być jeszcze trzecia generacja? Kobayashi, który nie wierzył w możliwość przegranej, nazwał te megakwarki „pięknym” i „prawdziwym”, uzupełniając cały ich zbiór. Oba zostały później odkryte, odpowiednio w latach 1977 i 1995.

Spotkanie z Ramą kończy się tym, że ludzie wciąż nie znają odpowiedzi na wiele pytań, takich jak to, kim byli kosmici i dlaczego zdecydowali się robić wszystko potrójnie. W fizyce cząstek elementarnych jest tak samo.

Dlaczego istnieją trzy pokolenia kwarków i leptonów? Nikt nie wie. Czy może być czwarte pokolenie każdego rodzaju? Nikt nie wie. Czy te trzy pokolenia są jakoś związane z trzema kolorami? Nikt nie wie.

Może pewnego dnia uda się pokonać uwięzienie nici gluonowej i dokonać analizy wyodrębnionego kwarka, aby uzyskać lepszy wgląd w jego zachowanie. Może pewnego dnia wpadną nam w ręce: nagi kwark powabny, nagi kwark dziwny lub nagi kwark górny. Być może pewnego dnia, przy odrobinie szczęścia, uda nam się zerknąć przez chwilę na nagi kwark piękny.

[89](#) *Who Ordered That?*, „Nature” (Editorial) 2016, t. 531 (2016), s. 139–140.

[90](#) M.L. Perl i in., *Evidence for Anomalous Lepton Production in e^+e^- Annihilation*, „Physical Review Letters” 1975, t. 35, nr 22.

- [91](#) R.P. Feynman, *QED...*, op. cit.
- [92](#) M. Kaku, *Beauty Is Truth*, „Forbes Magazine”, 7 listopada 2008 r.
- [93](#) L. Lederman, *Neutrino Physics*, wykład wygłoszony 9 stycznia 1963 r., *Brookhaven Lecture Series on Unity of Science*, BNL 787, nr 23.
- [94](#) W przekładzie K. Bartnickiego (przyp. red.).
- [95](#) Wywiad z Gell-Mannem, dostęp na <https://www.youtube.com/watch?v=po-SQ33Kn6U> (dostęp 15 grudnia 2018 r.).
- [96](#) F. Wilczek, *Time's (Almost) Reversible Arrow*, „Quanta Magazine”, 7 stycznia 2016 r.
- [97](#) M.E. Peskin, D.V. Schroeder, *An Introduction to Quantum Field Theory*, Addison-Wesley, Boston 1995.
- [98](#) *Glue* (ang.) – klej, sklejać (przyp. tłum.).

Rozdział 14

Kochanie, gdzie mój Higgs?

Jej Wysokość Królowa Fizyki

4 lipca 2012 roku gazety na całym świecie ogłosiły doniosły dzień dla nauki. W „Independent” nagłówek na pierwszej stronie głosił: „Naukowcy dowodzą istnienia boskiej cząstki”. CBC News donosiło, że odnaleziono „brakujący kamień węgielny fizyki cząstek”, a „New York Times” pisał, że „fizycy znaleźli nieuchwytną cząstkę uznawaną za klucz do Wszechświata”.

Było to imponujące odkrycie bozonu Higgsa i wszystkich zastanawiało, o co chodzi w tym zamieszaniu. Bozon Higgsa jest jednak tak skomplikowany, że nie da się go objaśnić w skrócie, i do tego w mediach.

Jest tak bardzo skomplikowany, że w 1993 roku minister nauki Wielkiej Brytanii William Waldegrave zaoferował butelkę szampana każdemu krajowemu naukowcowi potrafiącemu na jednej stronie kartki papieru podsumować to, co zrobił Higgs⁹⁹. Nie zamierzamy tego tutaj robić (bo raczej wolałbym koktajl mleczny), ale spróbujemy uchwycić, o co chodzi z tym bozonem Higgsa.

Ważne jest to, że potwierdza on przypuszczenie fizyków, po raz pierwszy wypowiedziane prawie pięćdziesiąt lat temu. Do jego potwierdzenia trzeba było wybudować Wielki Zderzacz Hadronów – największą maszynę, jaką kiedykolwiek skonstruowano.

Skąd wiedzieliśmy, że jest to warte tego wysiłku? Mógłbym teraz wymyślić cząstkę i nazwać ją timonem, cząstkę, która sprawia, że

chcesz zerknąć na swój zegarek podczas nudnego filmu. Czy będziemy budować do tego maszynę?

Pomyślcie, skąd fizycy teoretycy wiedzą, że warto potwierdzać eksperymentalnie jakąś hipotezę? Jest tak wiele cząstek/pól i oddziaływań między nimi, jak zatem mamy wiedzieć, czy jakieś równania mają sens? Czy istnieje jakieś ostateczne prawo tworzenia nowych praw fizyki?

Odpowiedź brzmi – tak, a udzieliła jej jedna z najbłyskotliwszych i jednocześnie zupełnie nieznanymi fizyczek wszech czasów: Amalie Emmy Noether.

Na początku XX wieku Noether była jedną z dwóch kobiet, którym pozwolono studiować na Uniwersytecie w Erlangen w Niemczech i dodatkowo musiała uzyskiwać pozwolenie od każdego wykładowcy, na którego zajęcia chciała uczęszczać. Wierście lub nie, ale to, że była kobietą, nie przeszkadzało jej w zrozumieniu matematyki. Napisała serię wybitnych prac, które przyciągnęły uwagę powszechnie szanowanego matematyka Davida Hilberta.

Hilbert pomógł Noether w otrzymaniu pracy na Uniwersytecie w Getyndze, gdzie została jedyną kobietą wykładowcą. Stanowisko to było oczywiście bezpłatne, a jej wykłady musiały być reklamowane nazwiskiem Hilberta, ale przynajmniej zahaczyła się w akademii¹⁰⁰.

Jej los ostatecznie odmieniło odkrycie tego, co stało się chyba najważniejszą zasadą przewodnią fizyki teoretycznej: twierdzenie Noether. W pewnym sensie to wstyd, że aby być traktowaną na równi z mężczyznami, kobieta musiała zatriumfować nad wszystkimi fizykami płci męskiej na świecie, ale... uczyniło to z niej pewnego rodzaju twardziela. Mężczyźni nie okazywali jej wystarczającego szacunku, prześcignęła ich więc twierdzeniem o tak rozległym zastosowaniu, że stworzyło kamień węgielny QED i QCD oraz rozwiązywało pewne zagadki teorii względności, których nawet Einstein bez niego nie mógł rozstrzygnąć.

Twierdzenie Noether polega na znalezieniu tego, co fizycy nazywają „symetrią”, ideą, którą się trochę już bawiliśmy. Kiedy badamy zdarzenie lub cząstkę, używamy równań, które określają energię kinetyczną (ruch) i energię potencjalną (położenie w polu). Różnica

między tymi dwoma energiami nazywana jest lagranżjanem i każde prawo fizyczne ma taką cechę.

Zawsze jednak możemy zmienić szczegóły każdego badanego przez nas scenariusza. Jeśli przeprowadzimy nasz eksperyment, powiedzmy, w pobliżu silnego magnesu, lub zmienimy masę cząsteczki, to czasami zmieni to lagranżjan, a czasami pozostanie on niezmienny. Jeśli nasze zmiany *nie* zmieniają lagranżjanu, to wszystkie równania pozostają niezmienione i naszą teorię nazywamy symetryczną. Jeśli zmiana czegoś wpływa na lagranżjan, równania zmieniają się również i nasza teoria zawiera „symetrię złamaną”.

Twierdzenie Noether mówi, że jeżeli w teorii jest symetria, to musi istnieć związana z nią własność cząstek, która także nie ulega zmianie.

Na przykład założmy, że badamy cząstkę i decydujemy się przesunąć ją o metr w prawo. Zachowanie cząstki będzie identyczne. Nasza teoria jest więc symetryczna względem położenia.

Zgodnie z twierdzeniem Noether ta zmiana położenia jest wynikiem poruszania się cząstki z pewnym pędem z jednego miejsca w drugie, pęd musi być więc „zachowany”, to znaczy nie może być stworzony lub zniszczony. Cząstki mogą przekazywać pęd podczas zderzeń, ale pęd całkowity będący sumą wszystkich pędów przed zderzeniem i po nim jest bezwzględnie taki sam.

Innym przykładem zastosowania twierdzenia Noether jest fakt, że kiedy cząstka podróżuje w czasie w przód, prawa fizyki ponownie pozostają niezmiennie. Prawa fizyki są symetryczne względem czasu, zatem musi być z nim związana własność, która zostaje zachowana – okazuje się, że jest to energia (ponieważ chodzi o przyczynę/skutek). Émilie du Châtelet już udowodniła, że energia nigdy nie jest tworzona lub niszczona, ale twierdzenie Noether dało temu podstawę.

Ładunek jest kolejną wielkością zachowywaną, co wiąże się z tym, jak drga funkcja falowa cząstki. Dlatego właśnie fotony światła tworzą cząstki antymaterii i materii w tandemie. Ładunek musi być zachowany, zatem pozbawiony ładunku foton powinien stworzyć elektron z antyelektronem, aby utrzymać sumaryczny ładunek równy zeru. A to tylko kilka z wielu przykładów.

Twierdzenie Noether mówi nam, jakie własności możemy zmienić w prawie fizyki, a jakich nie, i było podstawą dla Diraca, Feynmana i Gell-Manna podczas ustalania, jak powinny działać kwantowe teorie pola. Noether dała nam prawo dla praw fizyki i trudno jest przecenić, jak bardzo jest to ważne.

Niestety, ponieważ była ona Żydówką, w czasach nazizmu została zmuszona do ucieczki z Niemiec do Ameryki. Miało to też jednak swą pozytywną stronę, ponieważ została przyjęta przez uwielbiających ją uczonych, dla których była niekwestionowaną królową. Zasłużyła sobie na to uznanie, a Einstein w jej nekrologu zamieszczonym w „New York Timesie” napisał, że była „najznacniejszym, twórczym geniuszem matematycznym, od kiedy kobiety uzyskały dostęp do wyższych studiów”¹⁰¹.

Spokojnie, maleńka

Jedna z zachowywanych wielkości, które wyłaniają się z twierdzenia Noether, nazywa się liczbą leptonową. Do zrozumienia tego nie trzeba specjalistycznej wiedzy: liczba leptonów we Wszechświecie pozostaje ta sama. Jest to prawo symetrii, ale na papierze wydaje się irytująco zbyt symetryczne, ponieważ znany jest jeden proces, w którym owa symetria jest łamana.

Nazywa się on rozpadem beta i został odkryty przez Madame Curie¹⁰² (drugą królową fizyki). Dzieje się tak, gdy proton w jądrze niestabilnego jądra zamienia się w neutron, pozornie przypadkowo. W ten sposób wypływa on elektron, który ucieka z atomu i zostaje przez nas wykryty jako promieniowanie radioaktywne.

Gdy rozpatrujemy ten proces z punktu widzenia prawa Noether, ma to sens, ponieważ ładunek musi być zachowany. Jeśli neutralny neutron zamienia się w dodatni proton, to musi się również pojawić elektron o ujemnym ładunku. Jednak jeśli liczba leptonowa ma być zachowana, to czy nie złamaliśmy tego prawa, tworząc elektron, którego wcześniej nie było?

Wolfgang Pauli (facet, który ustrzelił falę pilotującą de Broglie’a) wyjaśnił, że musiała się pojawić kolejna cząstka. Jakiś rodzaj

antyleptonu, który nie miał ładunku elektrycznego.

Enrico Fermi nazwał tę hipotetyczną cząstkę neutrinem, co oznacza „maleńką neutralną”, i przez dwadzieścia pięć lat polowaliśmy na nią, próbując udowodnić, że Noether ma rację. Niestety, neutrino to najbardziej niepozorne i nieoddziałujące cząstki znane fizyce, zatem łatwe to nie było.

Weźmy pod uwagę neutrino wytworzone w jądrze naszego Słońca, w którym protony i neutrony cały czas przekształcają się w siebie. Foton, będąc absorbowany i ponownie emitowany przez każdą napotkaną po drodze cząstkę, potrzebuje około dziesięciu tysięcy lat, aby wybić się z jądra i dotrzeć do powierzchni Słońca. A neutrino odbywa tę samą podróż w dwadzieścia trzy sekundy.

Ziemia jest stale bombardowana przez neutrino ze Słońca i prawie wszystkie przelatują przez naszą planetę w mgnieniu oka. Podczas gdy zdążysz przeczytać to zdanie, przez czubek twojego małego palca przeleciało około 65 miliardów neutrin.

Nie jest łatwo zbudować detektor czegoś zupełnie niezainteresowanego detekcją. Największym detektorem neutrin na świecie, ukrytym kilometr pod powierzchnią góry (w celu ekranowania promieni kosmicznych), jest SuperKamiokande (Super-K) w pobliżu Hida w Japonii.

W Super-K znajduje się zbiornik zawierający 50 000 ton ultraczystej wody, przez którą w każdej sekundzie przelatują biliony neutrin, a większość z nich nic nie robi. Jedynie od czasu do czasu wybijają elektron z atomu, co możemy wykryć w postaci słabej poświaty.

Neutrino okazały się prawdziwymi cząstkami i dzięki temu liczba leptonowa jest zachowana. Odkrycie ich zajęło ćwierć wieku, ale stanowią one elegancki dowód na to, że twierdzenie Noether jest słuszne. No i oczywiście grupują się w trzech pokoleniach: neutrino elektronowe, mionowe i taonowe.

Oznaka słabości

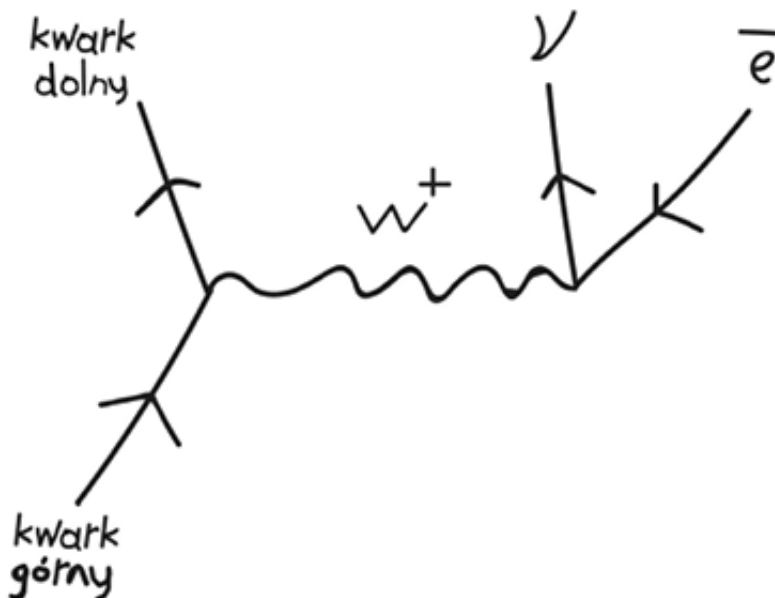
Powodem rzadkich oddziaływań neutrin jest to, że mają one bardzo niewiele własności i nie oddziałują z polami, które znamy. Nie mają

koloru, nie będą więc oddziaływać z polem gluonowym, nie mają ładunku, nie będą więc też oddziaływać z polem elektromagnetycznym/fotonowym.

Jednakże neutrino *będą* od czasu do czasu oddziaływać z elektronami. Dodatkowo wiemy, że kwarki emitują je podczas zmiany tożsamości z górnych na dolne, zatem musi być jakieś pole, z którym oddziałują w tym celu. Jakieś bardzo słabe. Nazywano je polem słabym. Poważnie.

Weźmy kwark górny z jego ładunkiem $+2/3$. Kiedy zamienia się w kwark dolny, o ładunku $-1/3$, jakosć traci ładunek $+1$. Zawsze uważaliśmy, że ładunek pozostaje, ale słabe pole może naruszać to założenie.

Oddziaływanie słabe może unosić dodatni ładunek od kwarka w postaci wirtualnej dodatnio naładowanej „cząstki słabej”. Cząstki wirtualne nigdy jednak nie są trwałe, ta więc wkrótce potem się rozpadnie, przenosząc energię w pola pozytonowe i neutrinowe, aby zachować ładunek i liczbę leptonową. W taki oto sposób możemy wyjaśnić, jak kwark górny zamienia się w kwark dolny:



Czytając od dołu do góry, zaczynamy od kwarka górnego. Sprzęga się on z polem słabym, generuje dodatnią cząstkę słabą (W^+) i zamienia się w kwark dolny.

Następnie ten dodatnio naładowany kwant słaby rozpada się, tworząc regularne neutrino (opisane przekrzywioną literą ν) i pozyton, aby zachować dodatni ładunek (pokazany jako elektron z małym przekreśleniem nad nim). Odwrotny proces również zachodzi, z takim wyjątkiem, że pojawia się cząstka W^- .

Prawdopodobnie myślisz, że cząstka pola słabego musi mieć jakąś równie zadziwiającą nazwę, taką jak foton lub gluon, niestety wszyscy wydawali się już znudzeni owym zoo, od niechcienia więc nazwali ją cząstką W : W^+ , jeśli ma ona dodatni ładunek, i W^- , jeśli ma ładunek ujemny.

Własność, którą cząstka powinna mieć, aby oddziaływać ze słabym polem i emitować cząstki W , nazywana jest „słabym izospinem” i występuje w dwóch odmianach, $+\frac{1}{2}$ i $-\frac{1}{2}$. Kwarki, leptony i neutrino mają słabe izospiny, ale ich stała sprzężenia jest bardzo mała, rzadko więc obserwujemy jego wpływ.

Co się jednak dzieje, w imię ducha pogromcy kotów Erwina Schrödingera, gdy spotykają się neutrino? Oba mają słabe izospiny, co oznacza, że powinny tworzyć między sobą cząstki wirtualne. Nie może się to dziać przez oddziaływanie W^+ lub W^- , ponieważ neutrino są pozbawione ładunku. Musi być jakaś trzecia słaba cząstka, i to niemająca ładunku. Sheldon Glashow nazwał ją cząstką Z . Jak sądzę, dlatego że ma ona ładunek zero.

W latach 1973 i 1983 odpowiednio cząstki Z i W zostały zaobserwowane w detektorze Gargamelle w Szwajcarii (nazwanym tak na cześć olbrzymki z powieści François Rabelais’go *Życie Gargantui i Pantagruela*, a nie złośliwego Gargamela ze *Smerfów*).

Odkrycie Z i W potwierdziło zachowanie neutrin, potwierdziło istnienie słabego pola i po raz kolejny potwierdziło poprawność twierdzenia Noether. Jednak jak pewnie już się domyślacie, fizyka kwantowa jest niczym piekielna kostka Rubika. Ledwie rozwiążemy jedną część, popłączemy coś innego.

Zupełnie bezużyteczny pomysł

Wszystkie kwantowe teorie pola dotyczą dwóch typów obiektów: cząstek materii (kwarków, elektronów, neutrin) i cząstek przenoszących oddziaływanie (fotonów, gluonów i W/Z).

Cząstki materii są zbiorowo nazywane fermionami i mają własności takie jak objętość, natomiast cząstki przenoszące siłę są zbiorowo nazywane bozonami i mogą się na siebie nakładać.

Twoje ciało jest zbudowane z fermionów (elektronów i kwarków), dlatego też masz pewną objętość. Natomiast wiązka światła składa się z bozonów (konkretnie fotonów), dlatego promienie latarki przechodzą przez siebie, a nie zderzają się ze sobą jak miecze świetlne. Pod tym względem bozony rozzaczarowują.

Kiedy cząstka oddziałuje z polem słabym, często wiąże się to ze zmianą ładunku, dlatego pola słabe i elektromagnetyczne są oczywiście sprzężone. Wczesna kwantowa teoria pola słabego nazwana była „kwantową dynamiką zapachu” (QFD), ale ponieważ pola słabe i elektromagnetyczne oddziałują ze sobą, pełna teoria, która obejmuje wszystkie oddziaływania fotonowe i słabe, została nazwana „teorią elektroślabą” i przyniosła Nagrodę Nobla dla Stevena Weinberga, Abdusa Salama i Sheldona Glashowa. Ja bym ją nazwał kwantową dynamiką elektroślabą, bo miałaby akronim: QEWD.

Jest to bardzo symetryczna teoria, ale ta elegancja jest również jej największą wadą, ponieważ foton i słabe pola są wielce odmienne.

Cząstki W i Z mają krótki zasięg, ale fotony wiecznie są w podróży. Oddziaływanie słabe wymaga trzech różnych cząstek, podczas gdy oddziaływanie elektromagnetyczne tylko jednej. Jest jeszcze złamanie symetrii największe ze wszystkich: cząstki W i Z mają masę, a fotony nie. Nie jest to cecha, jakiej oczekujemy od bozonów przenoszących siłę, które mogą się na siebie nakładać, coś więc dokonało złamania symetrii między polem fotonowym a polem słabym.

W połowie lat sześćdziesiątych trzech uczeni niezależnie wpadli na to samo rozwiązanie. Robert Brout, François Englert i Peter Higgs zasugerowali, że można zachować symetrię elektroślabą w taki sam sposób, w jaki Pauli rozwiązał problem symetrii pola leptonowego – dodać nowe pole/cząstkę.

Jak dowodzili, na początku istnienia Wszechświata, w pierwszym mgnieniu kreacji, pola elektromagnetyczne i słabe były identyczne, ale w tle czaiło się trzecie pole i kiedy się ono „włączyło”, wszystko uległo zmianie.

To nie jest pole takie jak inne, ponieważ jego wartość spoczynkowa nie jest równa zeru; wszędzie ma jakąś wartość. Ze względu na tak niezwykłą własność owo nowe pole miało zdolność do tworzenia różnych cząstek, a nie jednej. Te kwanty, nazwane bozonami Goldstone’a od nazwiska fizyka Jeffreya Goldstone’a, są głównie sprzężone z polem słabym.

Przedtem, zanim pojawiło się to pole, cząstki pola słabego były bezmasowe i miały nieskończony zasięg, podobnie jak fotony, ale kiedy bozony Goldstone’a mieszały się z nimi, ich charakter się zmienił i stały się W^+ , W^- i Z .

Lubię sobie wyobrażać, że pole słabe leżało właśnie na tym ekscentrycznym nowym polu jak tapeta na ścianie. Ściana ma trzy rodzaje wybrzuszeń na swojej powierzchni (bozony Goldstone’a), które uwidaczniając się przez słabą tapetę, sprawiają, że każdy obserwator uważa je za trzy rodzaje cząstek słabych.

Ponieważ pole fotonowe nie oddziałuje z tym dodatkowym polem, jego cząstki pozostają nietknięte, stając się fotonami, do których przywykliśmy. Bum. Symetria została skutecznie złamana... o ile da się wykryć to dziwaczne pole. Czego, o dziwo, nie można zrobić.

Idea niezerowego pola „włączającego się” w zaraniu czasu i mającego trzy rodzaje cząstek była nie tylko egzotyczna, lecz także niemożliwa do testowania, ponieważ bozony Goldstone’a są ukryte w cząstkach słabych, co czyni je niewidzialnymi.

Czasopisma, do których Brout, Englert i Higgs wysłali swe artykuły, odrzuciły je, a jedno z nich nawet odpowiedziało, że ta idea nie ma „oczywistego związku z fizyką”¹⁰³. Była to hipoteza starannie opracowana matematycznie, ale nie można było jej sprawdzić i Higgs gderał w obecności swego współpracownika, że „tego lata znalazł coś, co jest całkowicie bezużyteczne”¹⁰⁴.

Rozbite lustro

Wiemy jednak, że ta historia ma szczęśliwe zakończenie, powinniśmy więc przyrzeć się bliżej temu nowemu polu. W niektórych pozycjach literatury znajdziemy odniesienia do cząstek pola słabego „zjadających” bozony Goldstone’a. Jak to się dzieje? Odpowiedź jest związana z własnością cząstki, którą do tej pory ignorowaliśmy, ponieważ również ona wydaje się całkowicie bezużyteczna.

Ładunek, kolor, spin, słaby izospin itd. określają, jak cząstki oddziałują z różnymi polami, ale kwantowa teoria pola Diraca przewiduje inną własność zwaną chiralnością, od greckiego słowa oznaczającego „ręczność”. Jest to własność, którą mają cząstki, i nie robi ona absolutnie nic.

Chiralność może być opisana matematycznie, ale nie ma oczywistego znaczenia fizycznego. Wiemy tylko, że wydaje się, iż każda cząstka/pole oscyluje między jedną chiralnością a drugą, tam i z powrotem jak tik-tak zegara, a te dwie chiralności nazywamy lewoskrętną i prawoskrętną. Nie oznacza to, że cząstki machają na przemian małymi rączkami w powietrzu jak na jakiejś dyskotece, choć równie dobrze mogą. Nie mamy pojęcia.

Przez większość historii kwantów chiralność siedziała w równaniach, skacząc z lewej do prawej, a poza tym obijała się na tej synekurze. Cząstki odwracały swoją skrętność, a potem powracały i następnie odwracały. I na powrót. I jeszcze raz. Dopóki nie wprowadzono pola słabego.

W 1956 roku Chien-Shiung Wu i jej zespół przeprowadzali eksperymenty na atomach kobaltu, aby sprawdzić, jak symetryczne jest oddziaływanie słabe. Oddziaływania silne i elektromagnetyczne zachodzą tak samo, niezależnie od tego, w którą stronę skierowana jest cząstka, ale Wu odkryła, że oddziaływanie słabe łamie symetrię. Cząstki rozpadu radioaktywnego są emitowane tylko z atomu, którego stan ma chiralność lewoskrętną.

Chociaż cząstka taka jak kwark ma przez cały czas słaby izospin (własność pola słabego), to jej zdolność do oddziaływania z polem słabym możliwa jest tylko, gdy jej chiralność jest lewoskrętna. Mówimy, że cząstka lewoskrętna ma „słaby hiperładunek +1”, a prawoskrętna ma „słaby hiperładunek 0”, to znaczy, czy będzie oddziaływać z polem słabym, czy nie.

W tym momencie zaczynasz czuć, że cała ta fizyka kwantowa to kupa wariackich własności uzyskanych losowo podczas Wielkiego Wybuchu, bez ładu i składu. Jednak jeśli chcesz, aby prawa fizyki były trochę bardziej uporządkowane, obawiam się, że musisz znaleźć sobie inny wszechświat. Polecam ten, w którym jestem Batmanem. Chyba że już w nim jesteś, w takim razie zostań tam.

Przeżuwaj swoje bozony z zamkniętymi ustami

Wróćmy do bozonu Z , cząstki bez koloru i ładunku. Jest to w zasadzie foton, ale ma masę i oddziałuje z polem słabym, gdy jest w lewoskrętnym stanie chiralnym.

Ponieważ bozon Z naprzemiennie oddziałuje i nie oddziałuje z polem słabym, jego słaby hiperładunek zmienia się w kółko od $+1$ do 0 . Ale spójrzcie, kto się ku nam od wzgórza zbliża! To Emmy Noether!

„Wiesz co? – mówi. – Słaby hiperładunek jest także własnością zachowywaną”. I oddala się z uśmiechem zadowolenia ze szkody, jaką uczyniła.

Zgodnie z twierdzeniem Noether jeśli bozon Z włącza i wyłącza swój słaby hiperładunek, to ta własność musi skądś przychodzić i odchodzić. Jest to własność zachowywana, nie może więc znikać ani się pojawiać. Musi istnieć pole, które może pochłaniać i oddawać słaby hiperładunek bozonu Z . I to właśnie robi pole Brouta–Englerta–Higgsa.

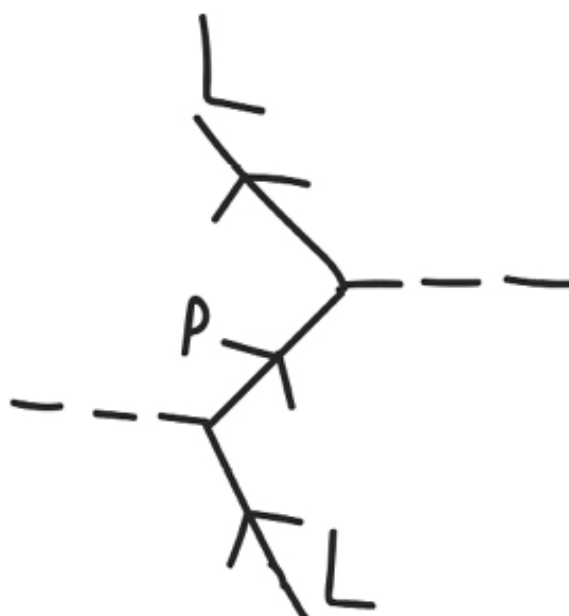
Za każdym razem gdy bozon Z staje się lewoskrętny, wysysa słaby hiperładunek z pola (absorbując bozon Goldstone’a), a gdy odwraca chiralność na prawoskrętną, zwraca słaby hiperładunek do pola (uwalnia bozon Goldstone’a).

Wyobrażam sobie cząstkę Z jako jedną z tych kłapiących szczęk, szczęk zabawek, które ciągle się otwierają i zamykają, chwytając i wypływając słaby hiperładunek podczas ruchu.

Na diagramie Feynmana oznacza to, że cząstka Z nieustannie łączy się z polem Brouta–Englerta–Higgsa i od niego się odłącza, kiedy

więc odkryto cząstkę Z, odkryto także bozon Goldstone'a „w jej szczękach”.

Ten diagram Feynmana pokazuje cząstkę Z zygzakującą w górę strony, przerzucającą chiralność od lewoskrętnej do prawoskrętnej. Zaczyna w stanie L, a następnie przerzuca się do P, uwalniając w tym procesie bozon Goldstone'a, który unosi słaby hiperładunek (pokazany jako linia przerywana). Podróżuje przez chwilę w stanie P, a następnie wraca do stanu L, wchłaniając bozon Goldstone'a i odzyskując słaby hiperładunek. Na wieki wieków i zawsze.



Kogo to obchodzi?

Kiedy dwie cząstki oddziałują, ich pola się sprzęgają, ale jeśli cząstka stale zmienia swoją tożsamość, sprzężenie może zostać utracone.

To tak, jakby cząstka Z zmieniała nastrój co kilka sekund, przechodząc od żartobliwego i wesołego do ponurego i poważnego. Jeśli chcesz opowiedzieć żart cząstce Z, musisz zrobić to szybko, bo zaraz stanie się śmiertelnie poważna i interakcja zostanie utracona. Albo jeśli zechcesz opowiedzieć cząstce Z o śmierci swojego kucyka,

musisz być równie szybki, ponieważ za chwilę zaczniesz grę słów na ten temat.

Gdy cząstka Z zmienia swoją osobowość, trudniej wejść z nią w interakcję, a na cząstkę, z którą trudno wejść w interakcję, wpływ nie jest łatwy. Cząstki Z gnają przez otaczające je pola jak pocisk przez mgłę, ale na cząstkę, która nie zmienia osobowości, łatwiej oddziaływać.

Innymi słowy, szybkie odwracanie chiralności sprawia, że cząstka utrzymuje swoją trajektorię, podczas gdy powolne odwracanie chiralności powoduje, że łatwiej ją zakrzywić. Właśnie opisaliśmy różnicę między tym, co jest masywne, a tym, co jest lekkie.

Foton może ulegać odbiciu, ponieważ nie ma masy, ale cząstka Z nie jest łatwa do uchwycenia i utrzymuje swój pęd, dzięki czemu jest bardzo masywna. Zatem sama masa pochodzi z odwracania chiralności, a w konsekwencji pole Brouta–Englerta–Higgsa umożliwia cząstce Z nabycie masy, fotonowi zaś pozostawanie bez niej!

Dotyczy to nie tylko cząstki Z . Coś takiego jak mion odwraca swoją chiralność w tempie szybszym niż elektron, co oznacza, że trudniej byłoby go spowolnić, a tym samym wydawałoby się, że to cząstka cięższa. Oczywiście, że tak jest.

W rzeczywistości cząstki W^+ , W^- , elektrony, miony, taony i wszystkie kwarki stale odwracają swoją chiralność, co oznacza, że ich hiperładunek musi być zachowany w polu Brouta–Englerta–Higgsa. Każda cząstka sprzęga się z tym polem za pomocą mechanizmu zwanego sprzężeniem Yukawy i okazuje się, że to właśnie dlatego cząstki mogą mieć masę. Teraz już nie jest to tak bezużyteczne, co?

Zachowujące masę pole, które łamie symetrię, Batmanie!

Jak już widzieliśmy, nie ma sposobu na wykrycie pola Brouta–Englerta–Higgsa. Bozony Goldstone’a, które pozwalają cząstkom na

odwracanie chiralności (zyskiwanie masy), mieszają się z samymi cząstkami i nie występują samodzielnie.

A laureat Nagrody Nobla Leon Lederman napisał nawet całą książkę o tej frustracji. Pierwotnie chciał ją zatytułować *God-damn Particle* (Cholerna cząstka), ponieważ bozony Goldstone'a są tak cholernie trudne do wykrycia, ale jego wydawcy nie byli z tego zadowoleni, skrócił więc tytuł, pozostawiając *God Particle* (Boską cząstkę). Co jest znacznie mniej kontrowersyjnym określeniem¹⁰⁵.

Jak więc wykryć pole, którego cząstki są zawsze zmieszane z innymi? Tu Peter Higgs poszedł dalej niż Brout i Englert i dlatego zaczęto je nazywać polem Higgsa (też pewnie dlatego, że tak łatwiej mówić).

Ponieważ pole to różni się od innych, Higgs uważał, że może robić ono coś nowego: powodować fale uderzeniowe. Pozostałe pola mają wartość zerową w każdym punkcie przestrzeni, ale pole Higgsa nie jest zerowe i jeśli przywalisz w nie dostatecznie silnie, możesz przez nie przesłać krótkotrwały impuls, wykrywalny jako krótkotrwały kwant pola Higgsa. Bozon Higgsa.

Teoretycznie bozon Higgsa nie robi nic ciekawego, po prostu udowadnia, że pole Higgsa tam jest, dlatego fizycy mieli trudności z wyjaśnieniem eksperymentu w 2012 roku. Wielki Zderzacz Hadronów ma obwód 27 kilometrów, powstał kosztem 9 miliardów dolarów, a jego utrzymanie kosztuje kolejny miliard dolarów rocznie i pobiera 1,3 terawata energii elektrycznej. Gdyby zatem dziennikarz zadał całkiem proste pytanie: „Co takiego robi ten bozon Higgsa?“, nierozsądnie byłoby odpowiedzieć: „Och, w zasadzie to nic”.

Tak naprawdę pole Higgsa i bozony Goldstone'a robią ciekawe rzeczy, ale są to oślizłe dranie, aby więc sprawdzić, czy one tam są, musimy stworzyć bezsensowną cząstkę w takim polu. Bozon Higgsa nie nadaje cząstkom masy, ale dowodzi, że poprawna jest teoria dotycząca tego, jak uzyskują one masę, i właśnie do tego był potrzebny Wielki Zderzacz Hadronów.

Bierzemy wiązkę hadronów (cząstki utworzone z kwarków) i wysyłamy ją do gigantycznej rury, która wykorzystuje elektromagnetyzm w celu przyspieszenia ich po okręgu, do takiej imponującej wirówki. Schłodzone do kilku stopni poniżej

temperatury, jaką ma pusta przestrzeń, poruszające się z prędkością 99,9 procent prędkości światła hadrony te są następnie zderzane ze sobą w różnych miejscach okręgu, a uwolniona energia w końcu zostaje rozdzielona na wszystkie pola.

Czasami ujmuje się to tak, jakby kwarki, zderzając się ze sobą, uwalniały cząstki będące wewnątrz, ale nie o to chodzi. Kwarki nie mają cząstek w środku, ale kiedy je rozbijamy, uwolniona energia jest tak ogromna, że przenosi się na wszystkie inne pola, a w rezultacie zderzenia powstają elektrony, miony, taony, neutrino, antymateria, gluony, fotony, cząstki W i Z, a jeśli mamy dużo szczęścia, to wstrząśnie ona polem Higgsa i zobaczymy maleńki pik w odczycie przyrządu.

W wypełnionej po brzegi sali wykładowej we Francji w Dniu Niepodległości w 2012 roku w końcu ogłoszono (za pomocą prezentacji w PowerPoint stworzonej czcionką comic sans) odkrycie cząstki o własnościach Bozonu Higgsa.

Peter Higgs, który był w audytorium, zaczął płakać, gdy wokół niego wybuchły brawa. Trwające 48 lat badania dobiegły końca, a jego hipoteza została potwierdzona.

Dom, który zbudowała Emmy

Ogromna jest lista cząstek w kwantowej teorii pola. Weźmy na przykład liczbę kwarków. Zaczynamy od sześciu głównych pól: górne, dolne, powabne, dziwne, prawdziwe i piękne, ale każde z nich może mieć trzy kolory (czerwony, zielony i niebieski), co daje nam 18 cząstek/pól. Następnie musimy włączyć wszystkie kwarki antymaterii, co daje nam 36 cząstek. A jeśli dodamy chiralność lewo- i prawoskrętną, to mamy w sumie 72 cząstki.

Większość odmian jest jednak prawie identyczna, zamiast więc umieszczać każdą możliwą wersję cząstki w odpowiedniej tabeli okresowej, możemy sporządzić uproszczoną tabelę, taką jak ta:

FERMIONY (MATERIA)			BOZONY (ODDZIAŁYWANIA)
Kwark górny Kwark dolny	Kwark powabny Kwark dziwny	Kwark prawdziwy Kwark piękny	Foton Gluon × 8 W+ W− Z Higgs
Elektron Neutrinoelektronowe	Mion Neutrinomionowe	Taon Neutrino taonowe	

Powyższa zawartość odzwierciedla cały wiek naukowych eksperymentów spiętych symetryczną kokardą twierdzenia Noether.

Na fundamentach, które ona położyła, budowali Dirac, Feynman, Gell-Mann, Weinberg, Salam, Glashow, Higgs i wielu innych, tworząc strukturę o genialnej i pięknej zarazem złożoności.

Nazywamy to Modelem Standardowym fizyki cząstek, ponieważ prezentuje on każdą cząstkę oraz każde oddziaływanie pomiędzy nimi i jest szczytowym osiągnięciem fizyki.

Dla niektórych Wielki Zderzacz Hadronów może wydawać się marnowaniem wysiłków, ale warto pamiętać, że była to maszyna zbudowana w celu sprawdzenia najważniejszej teorii budowy Wszechświata. Kwantowa teoria pola i twierdzenie Noether stawiają nam największe pytanie, warto więc w reakcji na nie zbudować największą odpowiedź.

[99](#) K. Jepsen, *Famous Higgs Analogy, Illustrated, Symmetry Magazine*, 9 czerwca 2013 r.

[100](#) J.W. Brewer, M.K. Smith, *Emmy Noether: A Tribute to Her Life and Work*, Marcel Dekker Inc., Nowy Jork 1981.

[101](#) A. Einstein, *Obituary of Amalie 'Emmy' Noether*, „New York Times”, 5 maja 1935 r., cyt. za: A. Pais, *„Pan Bóg jest wyrafinowany”... Nauka i życie Alberta Einsteina*, przeł. P. Amsterdamski, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001, s. 280.

[102](#) Autor przesadził w swym zapale. Zjawisko promieniotwórczości odkrył Henri Becquerel w 1896 r. Maria i Piotr Curie systematycznie je badali, czego rezultatem było odkrycie polonu w 1898 r. W 1899 r. Ernest Rutherford wprowadził podział emisji na promieniowanie alfa i beta. W 1900 r. Paul Villard zidentyfikował trzeci rodzaj emisji, który w 1903 r. Rutherford nazwał promieniowaniem gamma (przyp. tłum.).

[103](#) *Why Is the Higgs Discovery so Significant?*, Science and Technology Facilities Council (22 września 2017 r.), dostępne na: <https://stfc.ukri.org/research/particle-physics-and-particle-astrophysics/peter-higgs-a-truly-british-scientist/why-is-thehiggs-discovery-so-significant> (dostęp 15 grudnia 2018 r.).

[104](#) P. Rogers, *The Heart of the Matter*, „Independent”, 1 września 2004 r.

[105](#) L.M. Lederman, D. Teresi, *Boska cząstka. Jeśli Wszechświat jest odpowiedzią, jak brzmi pytanie?*, przeł. E. Kołodziej-Józefowicz, Prószyński i S-ka, Warszawa 2012.

Rozdział 15

Kłopoty z G

Prawie wszystko

Rzeczywistość, w której żyjemy, zawdzięcza niemal całe piękno i złożoność trzem oddziaływaniom kwantowej teorii pola: oddziaływaniu silnemu, elektromagnetycznemu i słabemu.

Bez oddziaływania silnego jądra w centrach atomów nie byłyby stabilne, a protony po prostu by się rozleciały, zanim cokolwiek zdążyłoby się uformować. Gluony i kwarki, które wiążą wszystko razem, powodują, że Wszechświat stworzył nas z czegoś więcej niż tylko z wodoru. Nasze organizmy, zawierające węgiel, azot, tlen, fosfor, siarkę, sód, chlor, wapń i żelazo, a w istocie cały układ okresowy pierwiastków, zawdzięczają swoje istnienie prawom chromodynamiki kwantowej.

Te pierwiastki, po połączeniu ze sobą, mogą tworzyć skomplikowane cząsteczki chemiczne zawierające elektrony, które wymieniają energię przez transfer fotonów, co umożliwia każdą reakcję. Nie tylko to. Ziemia, po której stąpasz, odpycha się od ciebie tylko dlatego, że elektrony w twoich stopach i elektrony w ziemi wywierają na siebie wzajemnie siłę na skutek oddziaływania elektronów i fotonów.

Kiedy popychasz lub pociągasz coś, kiedy czujesz tarcie lub ciągnięcie, kiedy doświadczasz wyporu hydrostatycznego lub innego zjawiska opisywanego przez mechanikę newtonowską, doświadczasz elektrycznego odpychania od pola fotonowego, nie wspominając już

o tym, że przede wszystkim widzisz dzięki istnieniu światła. Prawa chemii, fizyki klasycznej i optyki wyłaniają się z praw elektrodynamiki kwantowej.

I jeszcze ta wspaniałość biologii. Najbardziej skomplikowana z nauk, której najprostsze struktury składają się z molekuł tworzących łańcuchy o długości miliardów atomów. Gdy pasma DNA w komórkach się replikują, mutacje w kodzie genetycznym prowadzą do pojawienia się nowych cech, które zostają przekazane dalszym pokoleniom, co pozwala gatunkowi na różnorodność i ewolucję. Mutacje te są czasami powodowane błędami transkrypcji w procesie kopiowania, ale do tej pory wszystko posuwa się do przodu. Prawdziwym darem dla życia na Ziemi są radioaktywne cząstki, które przenikają do naszej atmosfery i zakłócają proces kodowania: są to pozostałości wiatrów słonecznych i zjawisk astronomicznych w chłodnej przestrzeni kosmicznej z towarzyszącym im rozpadem cząstek.

Bez bozonów W lub Z takie rozpady radioaktywne nigdy by nie zaszły, a życie na Ziemi byłoby ograniczone do kilkudziesięciu rodzajów bakterii kłębiących się w basenach skalnych. A bez bozonów W i Z kwarki w jądrze Słońca nie byłyby w stanie przekształcać protonów w neutrony, co uniemożliwiłoby fuzję jądrową i tym samym świecenie naszej gwiazdy. Tylko dzięki prawom teorii elektroslabej możliwa jest trwałość samego życia i ten przytłaczający cud bioróżnorodności.

Kwarki i lepton, z których zbudowane jest ciało, fotony i gluony, bozony, które każą im oddziaływać, pole Higgsa, które nadaje masę, i neutrino, które utrzymują to wszystko w równowadze, uwzględnione są w Modelu Standardowym fizyki cząstek i leżącej u jego podstaw kwantowej teorii pola.

Nie wiemy wszystkiego i wciąż pozostają ważne pytania, na które szukamy odpowiedzi, ale kwantowa teoria pola wskazuje nam właściwy kierunek. To prawda, że stawiamy dziecinne kroki w tej nowej dziedzinie, ale przynajmniej nie błądzimy już na oślep. Każde zdarzenie w historii jest wynikiem oddziaływania cząstek za pośrednictwem pól, ale mamy teraz podstawy, dzięki którym będziemy mogli to wszystko wyjaśnić. Z wyjątkiem jednego zjawiska,

tego, z którym kwantowa teoria pola nie potrafi sobie poradzić. Grawitacji.

Słabsze niż słabe

Historia o jabłku, które uderzyło Newtona w głowę, jest trochę apokryficzna. Leżąc pod jabłonią w pobliżu swego domu w Lincolnshire, uczony obserwował podobno spadające owoce, a kiedy jeden uderzył go w głowę, uznał to za dziwne¹⁰⁶.

Większość sił wywieranych na spadające jabłko można wytłumaczyć za pomocą prostej mechaniki. Pęknięcie gałęzi jest wynikiem przegrupowania atomów wewnątrz niej. Gdy jabłko porusza się w powietrzu, „uderza” w cząstki powietrza, spowalniając ich przyspieszenie, a gdy już uderzy w ziemię, na podstawie prostszych praw możemy wyjaśnić, dlaczego toczy się i pęka w określony sposób.

Wszystkie te zjawiska są wynikiem oddziaływań cząstka–cząstka, w większości wyjaśnianych przez teorie QED i oddziaływanie elektronowo-fotonowe. Co jednak w pierwszej kolejności sprawia, że jabłko w ogóle spada? To najważniejsze pytanie.

Niestety, Newton nie wynalazł grawitacji; obiekty nie unosiły się w powietrzu przed 1687 rokiem. On zdał sobie sprawę z tego, że sama grawitacja jest siłą. Jabłka nie poruszają się w dół z tego względu, że ten kierunek ruchu jest preferowany, jak twierdził Arystoteles, a podczas spadania mkną coraz szybciej, co oznacza, że aktywnie coś je ciągnie.

Prostym sposobem udowodnienia tego jest wykazanie, że jabłko spadające z drzewa uderza w ziemię silniej niż to spadające z kilku centymetrów nad ziemią. Najwyraźniej im dłużej spada, tym większą ma prędkość, a jeśli coś sprawia, że nabiera prędkości, to na jabłko musi wywierać siłę.

Newton uświadomił sobie, że obiekty mające masę (później Einstein dowiódł, że także mające energię) komunikują się ze sobą przez jakieś niewidzialne przyciągające medium, które teraz nazywamy polem grawitacyjnym. Wraz z polami słabymi,

elektromagnetycznymi i silnymi grawitacja jest podstawową siłą natury.

Intuicyjnie pewnie podejrzewasz, że grawitacja jest najsilniejszą z czterech sił, ale realnie jest ona słabsza od oddziaływania słabego o współczynnik wynoszący około tryliona. Grawitacja jest siłą, z którą jednak należy się liczyć (proszę bardzo), ma ona bowiem nieskończony zasięg i działa absolutnie *na wszystko*. Wszystkie kwarki, leptony, gluony, fotony, bozony W i Z oraz cząstki Higgsa są przyciągane przez jej bezwzględnie zachłanność.

Ponieważ oddziaływania silne, słabe i elektromagnetyczne przeskakują radośnie z cząstki na cząstkę, ledwo dostrzegając grawitację, czai się ona w ich cieniu, subtelnie, cicho i bezwzględnie wiążąc wszystko razem i nic nie zdoła jej umknąć. Nawet światło. A nawet sam czas.

Teraz kiedy siedzisz i to czytasz, książka, którą trzymasz w ręce, jest grawitacyjnie przyciągana do twojej twarzy i odwrotnie. Nie odczuwasz tej grawitacji, ponieważ dopiero dla masy wielkości planety siła ta staje się istotna, ale wszystko wokół nas bardzo, bardzo powoli zapada się ku sobie.

Można chwilowo i na małą skalę pokonać grawitację – magnes z łatwością podniesie z ziemi spinacz do papieru – lecz w szerszej perspektywie grawitacja trzyma wszystko na powierzchni Ziemi i nie odpuści bez wysiłku z naszej strony.

Pozostałe trzy siły da się wyjaśnić wprowadzeniem cząstek wirtualnych poruszających się między materią i analogicznie można wprowadzić grawiton, cząstkę, która będzie przenosić grawitację.

Odkrycie grawitonu będzie jednak trudne, ponieważ jest to tak słabe oddziaływanie, że aby uzyskać energię wystarczającą do wzbudzenia pola, musielibyśmy zbudować zderzacz cząstek o rozmiarach mniej więcej takich jak galaktyka. A nawet gdybyśmy to zrobili, energia takiego zderzenia byłaby tak ogromna, że w miejscu zderzenia powstałaby czarna dziura, która wessałaby grawitony do swego środka i nigdy byśmy ich nie ujrzeli. Jeśli nie uda nam się znaleźć innego sposobu wykrywania cząstek i pól, grawitony pozostaną w ukryciu.

Niepasujący element

Grawitacja różni się od pozostałych trzech sił pod wieloma względami. Nie tylko jest troszeczkę bardziej asymetryczna (w sposób, w jaki oddziaływania elektromagnetyczne i słabe są asymetryczne względem siebie), wręcz jest to niekwestionowany Quasimodo fizyki. Oto niektóre z tych złośliwości, które napotykamy ze strony grawitacji.

1. Grawitacja jest słabsza od innych sił o zatrważający współczynnik. Jeśli przedstawimy natężenia pozostałych trzech oddziaływań w postaci szpilek wbitych w linę, to wszystkie ustawiłyby się w odległości jednego centymetra od siebie, ponieważ wszystkie natężenia są porównywalne. Szpilka oznaczająca grawitację znalazłaby się gdzieś na zewnątrz Ziemi w kierunku Galaktyki Andromedy.
2. Posługując się kwantową teorią pola, możemy przewidzieć, jak wiele energii powinna mieć próżnia pustej przestrzeni (wynik dodania energii wszystkich tych cząstek wirtualnych). Łączna wartość energii próżni powinna wynieść około 10^{105} dżuli na centymetr sześcienny, ale kiedy faktycznie mierzymy tę energię, obserwując na przykład wpływ grawitacji na galaktyki, to otrzymujemy 10–15 dżuli na centymetr sześcienny. Wartość, którą przewiduje kwantowa teoria pola, i wartość wynikająca z pomiarów grawitacji różnią się o współczynnik kilku milionów kwadrylionów. Jak już wiemy, kwantowa teoria pola szczyci się najdokładniejszym przewidywaniem w całej nauce, ale włączenie grawitacji do jej równań daje nam *najgorsze* przewidywanie w nauce.
3. Jedną z cech fermionów (cząstek materii takich jak kwarki, elektrony i neutrino) jest to, że mają swoją objętość w przestrzeni. Jest to cecha zwana zakazem Pauliego, który stwierdza, że tożsamości cząstek, w tym energie i położenia, są wyłącznie ich indywidualną własnością. Fermiony pozostają

rozdzielone za wszelką cenę, ale w centrum czarnej dziury pojawia się wystarczająco silna grawitacja, aby cząstki zostały zgniecione. W kwantowej teorii pola zakaz Pauliego jest nienaruszalny. W teoriach grawitacji łatwo można go złamać.

4. Teoria opisująca działanie grawitacji to ogólna teoria względności Einsteina, która wiąże razem energię, masę, czas, światło i pustą przestrzeń. Oficjalnie uznaje się, że Einstein wymyślił ją w 1916 roku, chociaż – o czym mało kto wie – w istocie odkrył tę teorię już w 1912 roku, ale prawdopodobnie uznał, że równania są błędne, i nikomu o nich nie powiedział¹⁰⁷.

Ogólna teoria względności opisuje zniekształcenie pustej przestrzeni na skutek jej wygięcia wokół pojawiającego się w niej obiektu mającego masę i ten proces postrzegamy jako grawitację. Teoria ta doskonale zgadza się z wynikami eksperymentalnymi i opiera się na istotnym założeniu, że przestrzeń jest gładka w każdym punkcie o wyraźnie określonym położeniu. Jednak w mechanice kwantowej zasada nieokreśloności Heisenberga mówi, że tak nigdy nie może być. Wszystkie pola i cząstki drgają, co oznacza, że żadna teoria opisująca obiekty jako gładkie nie może być poprawna. Grawitony musiałyby podlegać zasadzie nieokreśloności Heisenberga, podczas gdy sama grawitacja najwyraźniej nie.

5. Pozostałe trzy pola sił występują na tle pustej przestrzeni. Cząsteczki mogą być z nich wyrzucane, ale kształt pól podlega rozsądnej geometrii. Natomiast w ogólnej teorii względności pusta przestrzeń może być zakrzywiona.

Wszystkie cząstki, które kiedyś poruszały się po liniach prostych, nagle znajdują się w przestrzeni zmieniającej kształt i nie mamy możliwości wyjaśnienia, jak to na nie wpływa. Możemy wykorzystać grawitację, aby wyjaśnić, jak to wpływa na ogromny

zbiór cząstek, ale siły grawitacji działającej na pojedynczą cząstkę nie da się łatwo obliczyć.

Grawitacja to nie tylko samotny dzieciak na prywatce. To tyran, kopiący wszystkich wokół, tłukący abażury i zachowujący się obscenicznie w telewizji. Kwantowa teoria pola działa zgrabnie dopóty, dopóki nie uwzględniamy grawitacji, wówczas bowiem wszystko się załamuje. I jest to najbardziej ekscytująca rzecz, jaka mogła się wydarzyć.

Drzewo wiedzy

Każdy obiekt w pobliżu powierzchni Ziemi jest przyciągany do niej przez grawitację. Newton uświadomił sobie, że ta sama siła działa w kosmosie na wszystkie słońca, księżyce i planety, ponieważ grawitacja jest prawem uniwersalnym, odnoszącym się zarówno do niebios, jak i do Ziemi. Dzięki niemu dwie pozornie różne dziedziny rzeczywistości zostały połączone jednym prostym wyjaśnieniem.

Kilka wieków później Einstein odkrył, że prawa energii leżą u tych samych podstaw, i włączył je do teorii względności. Po raz kolejny wykazał, że dwie odrębne gałęzie fizyki były połączone nieznanym wcześniej związkiem.

Tymczasem Michael Faraday, odkrywając, że pola elektryczne i magnetyczne, uważane za odrębne, są różnymi aspektami tego samego pola, dał nam jednolite wyjaśnienie elektryczności, magnetyzmu i światła.

Następnie fizycy kwantowi wzięli te prawa elektromagnetyzmu i połączyli je z fizyką cząstek, tworząc QED, a później połączyli QED z radioaktywnością i oddziaływaniem słabym, aby zbudować teorię oddziaływań elektroślabych.

Wciąż dzieje się podobnie. Zaczynamy rozwijać zagadnienia z różnych poziomów naszej wiedzy, takie, które wydają się ze sobą niepowiązane, ale dążąc do logicznych wniosków, odkrywamy związki między teoriami, które jak gałązki łączą się w konary drzewa.

Im dokładniej badamy Wszechświat, tym bardziej te gałęzki się ze sobą łączą.

W chwili obecnej nasze drzewo wiedzy jest siecią teorii, wywodzących się z trzech głównych konarów. Jednym jest ogólna teoria względności, która wyjaśnia astronomię, kosmologię i grawitację. Drugim jest teoria oddziaływań elektroslabych, która wyjaśnia masę, światło, radioaktywność, siły klasyczne i chemię. Trzecim jest chromodynamika kwantowa, która wyjaśnia zjawiska zachodzące w jądrze atomowym. A teraz jesteśmy całkiem blisko połączenia tych dwóch ostatnich.

Obecnie staramy się wynaleźć pomysłowe sposoby na połączenie teorii oddziaływań elektroslabych z chromodynamiką kwantową, aby stworzyć „wielką zunifikowaną teorię” (GUT), która za jednym zamachem obejmie całość Modelu Standardowego.

Jeśli uda nam się opracować poprawną GUT, to fizyka będzie wyjaśniać wszystko przez swoje dwa konary: grawitację przez ogólną teorię względności i wszystko inne przez kompletną kwantową teorię pola. Czy moglibyśmy w końcu zebrać je razem w jedną całość? Czy istnieje jedna teoria wszystkiego, która wyjaśni sprzeczności między grawitacją a siłami kwantowymi? Nie wiemy, ale będziemy próbować ze wszystkich sił.

Początek

Wiek temu wydawało się, że mamy odpowiedzi na wszystkie pytania. Od tamtego czasu fizyka kwantowa nauczyła nas trochę pokory. Wygląda na to, że zamiast dążyć do rozwiązań, dzieło dopiero się zaczyna i jest to dobry powód do ekscytacji. Mamy przed sobą trudne zadanie, ale fakt, że dotarliśmy tak daleko w tak krótkim czasie, daje mi ogromną nadzieję.

Człowiek jest nie tylko głodny wiedzy, ale także ma mózg zdolny do jej przyswojenia. Nie lubimy frazy „nikt nie wie” i zdecydowanie chcemy się dowiedzieć, gdzie jest nasze miejsce w tym największym projekcie. Dlatego nigdy nie przestajemy odpowiadać na pytania i kwestionować odpowiedzi. Wszechświat może być niewyobrażalnie

skomplikowany, ale jeśli potrafimy zrozumieć mechanikę kwantową, to kto wie, co jeszcze uda nam się zrobić.

Z tego powodu, jak i z wielu innych, szczerze wierzę, że nauka uratuje nasz gatunek.

[106](#) W. Stukeley, *Memoirs of Sir Isaac Newton's Life*, 1752 (reprint: The Royal Society, Londyn 2010).

[107](#) A.D. Aczel, *God's Equation*, Delta, Nowy Jork 2000.

Kalendarium fizyki kwantowej i cząstek elementarnych

Rozwój nauki rzadko postępuje liniowo. Nie zdając sobie sprawy z tego, co już zrobiono, czasami na podstawie teorii dokonuje się prognozy, którą przypadkowo już zweryfikowano lata wcześniej. Z obecnego punktu widzenia możemy poskładać elementy puzzle, tak że ułożą się w narrację, ale czasami w takim procesie tracimy historyczną ścisłość.

W książce skupiłem się na opowiadaniu historii, aby ułatwić nieco zrozumienie naszego skomplikowanego tematu, ale czasami poświęcałem chronologię na rzecz tego zadania. Tutaj gwoli historycznej ścisłości przedstawiona jest oś czasu, wskazująca, jak naprawdę sprawy się toczyły.

1618 Kartezjusz sugeruje, że światło jest falą w przestrzeni.

1672 Newton przypuszcza, że światło składa się z korpuskuł.

1801 Young wykonuje eksperyment z podwójną szczeliną, wykazując, że światło jest falą.

1846 Faraday spekuluje, że światło jest falą elektromagnetyczną.

1861 Maxwell udowadnia, że Faraday ma rację.

1897 J.J. Thomson odkrywa elektron.

1899 Rutherford odkrywa, że radioaktywność składa się z cząsteczek.

1900 Planck odkrywa kwanty światła.

1905 Einstein udowadnia, że cała materia składa się z atomów, a światło składa się z fotonów, i publikuje szczególną teorię względności. Kupuje tort na urodziny.

1908 Rutherford odkrywa jądro atomowe.

1912 Einstein tworzy ogólną teorię względności. Nie mówi o tym nikomu.

1913 Bohr odkrywa, że w powłokach energia elektronów jest kwantowana.

1915 Noether występuje ze swoim twierdzeniem. Siła ducha dziewczyny zwycięża.

1916 Einstein odkrywa na nowo ogólną teorię względności. Już o niej mówi.

1917 Rutherford odkrywa proton.

1922 Stern i Gerlach przeprowadzają eksperyment. Nie widać w nim sensu.

1924 De Broglie sugeruje dualizm falowo-korpuskularny.

1926 Schrödinger publikuje swoje równanie falowe.

1926 Born interpretuje pierwiastek kwadratowy z funkcji falowej jako prawdopodobne zachowanie i własności obiektu.

1927 Pauli dostosowuje równanie Schrödingera do włączenia „spinu”.

1927 Heisenberg odkrywa zasadę nieokreśloności.

1927 George Thomson dowodzi, że elektrony mogą ulegać dyfrakcji podobnie do fal.

1927 De Broglie przedstawia interpretację fali pilotującej.

1928 Dirac prezentuje kwantową teorię pola.

1930 Heisenberg przedstawia w zarysie interpretację kopenhaską. Einstein nie jest zadowolony.

1930 Pauli proponuje istnienie neutrin.

1932 Chadwick odkrywa neutron.

1932 Von Neumann próbuje ustalić źródło kolapsu funkcji falowej. Nic nie znajduje.

1932 Anderson odkrywa pozyton.

1933 Fermi proponuje pole słabe.

1935 Schrödinger sugeruje, że zabijamy/nie zabijamy kota.

1935 Yukawa proponuje silne oddziaływanie wyjaśniające stabilność jądra.

1935 Einstein, Podolsky i Rosen publikują paradoks.

1936 Odkrycie mionów.

1939 Rodzi się Batman.

1947 Odkrycie pionów.

1947 Odkrycie kaonów, zachowujących się dziwnie.

1949 Feynman, Schwinger i Tomonaga tworzą udane odmiany QED.

1952 Bohm rozszerza mechanikę kwantową o interpretację fali pilotującej.

1956 Neutrino elektronowe zostają w końcu odkryte.

1956 Wu odkrywa, że pole elektroslabe jest asymetryczne względem chiralności (i co za tym idzie, słabego hiperładunku).

1957 Everett proponuje interpretację wielu światów.

1961 Wigner sugeruje, że świadomość może powodować kolaps funkcji falowej.

1962 Odkrycie neutrino mionowego.

1964 Bell proponuje, jak sprawdzić poprawność paradoksu EPR.

1964 Gell-Mann przedstawia zarysy chromodynamiki kwantowej z kwarkiem górnym, dolnym i dziwnym.

1964 Glashow prezentuje hipotezę istnienia kwarka powabnego... no bo wierzy w piękno natury.

1964 Brout, Englert i Higgs przedstawiają hipotezę istnienia nowego pola nadającego cząstkom masę.

1968 Odkrycie kwarków górnych, dolnych i dziwnych.

1968 Weinberg, Salam i Glashow tworzą teorię oddziaływań elektroslabych.

1971 Hafele, Keating i pan Zegar weryfikują teorię względności.

1973 Kobayashi przedstawia hipotezę istnienia kwarka pięknego i prawdziwego.

1973 Odkrycie bozonu Z.

1974 Odkrycie kwarka powabnego.

1974 Odkrycie taonu.

1974 Odkrycie neutrino taonowego.

- 1977 Odkrycie kwarka pięknego.
- 1982 Aspect z powodzeniem przeprowadza eksperyment Bella, udowadniając, że fizyka klasyczna nie potrafi wyjaśnić splątania.
- 1983 Odkrycie bozonów W^+ i W^- .
- 1986 Cramer przedstawia interpretację transakcyjną.
- 1993 Peres, Wootters i Bennett proponują kwantową teleportację.
- 1994 Tonomura przeprowadza eksperyment z pojedynczym elektronem na podwójnej szczelinie, udowadniając jednoznacznie, że cząstki oddziałują same z sobą.
- 1995 Odkrycie kwarka prawdziwego.
- 1998 Rozpoczyna się budowa Wielkiego Zderzacza Hadronów.
- 1999 Kim buduje pierwszą kwantową gumkę z opóźnionym wyborem, pokazując pozorne splątanie kwantowe w czasie wstecz. Przypuszczalnie wysłała wiadomość do Cramera w 1986 roku.
- 2005 Couder przedstawia dowody, które mogą potwierdzić interpretację de Broglie'a–Bohma.
- 2008 Wielki Zderzacz Hadronów zostaje po raz pierwszy włączony.
- 2012 Odkrycie bozonu Higgsa w Wielkim Zderzaczu Hadronów.
- 2014 O'Connell dokonuje kwantowej superpozycji stanu pierwszego klasycznego obiektu.
- 2015 Bohr potencjalnie wyklucza wyjaśnienie de Broglie'a–Bohma.
- 2017 Jianwei dokonuje rekordowej teleportacji kwantowej na satelitę.
- 2017 Lidzey wiązką laserową przypadkowo splątuje niektóre bakterie.
- 2018 Vanner tworzy bęben kwantowy.

Dodatek 1

Bliższe spojrzenie na spin

Spin jest skwantowany wielokrotnościami liczby zwanej stałą Plancka, liczbą otrzymaną z podzielenia energii cząstki przez częstość związaną z nią fali, liczbą, która zawsze ma tę samą wartość: $6,6 \times 10^{-34}$ dżul $\times$ sekunda. Cząstki mogą mieć wartość spinu będącą wielokrotnością tej liczby albo jej połową, to znaczy cząstka może mieć wartość spinu równą $\frac{1}{2}$ stałej Plancka, 1 stałą Plancka, $1\frac{1}{2}$ stałej Plancka, 2 stałe Plancka, $2\frac{1}{2}$ stałej Plancka i tak dalej, a także może być dodatnia albo ujemna.

Cząstki o spinach połówkowych nazywane są „fermionami”, natomiast te o spinach całkowitych nazywane są „bozonami” i zachowują się zupełnie inaczej (przykłady znajdują się w rozdziale 14). Jednak nie wszystkie cząstki mają własności magnetyczne, mimo że wszystkie mają spin.

Istnieje pojęcie określające magnetyczny charakter cząstki: jej „moment magnetyczny”. Moment magnetyczny określa, jak silne jest pole magnetyczne cząstki, i wynika z następującej zależności:

$$\mu = g \frac{e}{2Mc} S$$

Symbol μ oznacza moment magnetyczny cząstki, który możemy uważać za „ładunek magnetyczny”. Współczynnik g , nazywany stosunkiem żyromagnetycznym, jest liczbą unikatową dla każdej cząstki, wiążącą razem pozostałe własności.

Tu e oznacza ładunek elektryczny, M masę, c prędkość światła (zob. rozdział 8), a S – coś, co nazywamy macierzą spinową, czyli siatką 2×2 liczb kontrolujących różne sposoby wirowania cząstki.

Dla obiektu codziennego definiujemy coś, co określa jego obrót i nazywa się „momentem pędu”. Ta wielkość opisuje, jak ciężka jest cząstka, jak szybko wiruje i w którą stronę następuje obrót (zgodnie z ruchem wskazówek zegara lub przeciwnie do ruchu wskazówek zegara). Do opisu obrotu kwantowego te wielkości nie wystarczają i musimy go opisać jako mający cztery możliwe kierunki (nazywamy je czterema wektorami spinu). Czasami spin jest określany jako „wewnętrzny moment pędu”, ponieważ jest to własność przypominająca moment pędu, ale wpisana w tożsamości cząstki, nawet gdy jest ona nieruchoma.

Równanie to ujawnia, że moment magnetyczny cząstki wynika ze wszystkich jej własności razem wziętych. W eksperymencie Sterna–Gerlacha w rzeczywistości mierzono moment magnetyczny atomów srebra, ale ponieważ masa, ładunek i g były identyczne dla każdej cząstki, oba kierunki, w których atomy wylatywały, musiały pochodzić od S – od własności spinu. Tak więc chociaż nie do końca był to pomiar spinu każdej cząstki (nie mamy na to bezpośredniego sposobu, ponieważ nie wiemy, jak w ogóle wyglądałby eksperyment spinowy), w każdym razie magnetyzm pozwala nam mierzyć różnice spinu.

Ważne jest również to, że aby cząstka była magnetyczna, musi mieć zarówno spin, jak i ładunek elektryczny. Cząstka, która ma spin, ale nie ma ładunku elektrycznego, na przykład neutrino (cząstka omawiana w rozdziale 14), ma spin $\frac{1}{2}$, ale nie ma ładunku elektrycznego, zatem w powyższym równaniu wstawilibyśmy zero w miejsce e i w wyniku otrzymalibyśmy zero. Ładunek elektryczny i magnetyzm są zawsze powiązane, a jeśli cząstka ma jedno, to na pewno ma i drugie.

Dodatek 2

Rozwiązywanie równania Schrödingera

Równanie Schrödingera dla pojedynczego elektronu krążącego wokół pojedynczego protonu (atom wodoru) można rozwiązać, ale kiedy włączamy więcej cząstek, nie da się otrzymać ścisłego rozwiązania.

Atom helu ma dwa protony i dwa elektrony, trzeba więc włączyć oddziaływania obu elektronów z jednym protonem, obu elektronów z drugim protonem, obu elektronów ze sobą, obu protonów ze sobą, a następnie wszystko to uwzględnić w równaniu. I to w trzech wymiarach.

Im większe są atomy lub molekuły, tym więcej oddziaływań musimy uwzględnić i dochodzimy do tego, że nawet potężne komputery z trudem radzą sobie z tym zadaniem. Dlatego sens ma zastosowanie jakichś przybliżeń, które pozwalają oszczędzać czas i jednocześnie uzyskać rozwiązania zbliżone do ścisłego rozwiązania równania Schrödingera.

Jedno z tych przybliżeń jest często nazywane metodą orbitali. Wyobraźcie sobie, że atom ma tylko jeden elektron i wzbudzacie go do wyższych energii, a on przechodzi na orbitale o coraz wyższych energiach.

Na przykład gdy próbujemy określić kształt atomu z 26 elektronami, często robimy tak, że wyobrażamy sobie atom wodoru i wzbudzamy jego elektron 26 razy, aż do momentu gdy wszystko będzie wyglądało mniej więcej dobrze.

Podobnie dziecko chce zrobić wrażenie dorosłego, stojąc na szczędłach i nosząc większe ubrania. Nie jest to całkiem dokładny

obraz, ale dość dobrze oddaje, że „tak mogłaby wyglądać większa wersja”.

Inną techniką, którą stosujemy, jest przybliżenie Borna–Oppenheimera, w którym przyjmujemy założenie, że energia i drgania jądra są tak małe w porównaniu z energią i drganiami elektronu, iż można je zignorować. Wyobrażamy sobie elektrony krążące/falujące wokół jednego punktu. A to pozwala nam skupić się wyłącznie na elektronach i ich oddziaływaniach, zaniehbując całkowicie wpływ jądra.

Jednak najlepszym sposobem na wymiganie się od rozwiązywania równania Schrödingera jest metoda nazwana teorią funkcjonału gęstości, wynaleziona przez Waltera Kohna i Johna Pople’a, którzy w 1998 roku otrzymali za nią Nagrodę Nobla.

Teoria funkcjonału gęstości, czyli DFT dla tych, którzy obracają się wśród kujonów, jest pięknym sposobem na rozwiązanie funkcji falowej molekuly. Zamiast traktować każdą cząstkę jak punkt i obliczać każde oddziaływanie osobno, DFT zastępuje elektrony „chmurą” wyobrażającą je wszystkie zbite w pulę.

Po rozmazaniu wszystkich elektronów razem i obliczeniu „grubości” gęstości elektronowej można mówić o tym, jak atom lub cząsteczka ewoluuje w czasie. Tam, gdzie chmura jest najgrubsza, najprawdopodobniej znajdują się elektrony, a tam, gdzie jest najcieńsza, będą one rzadko obserwowane.

Obliczenie DFT na małej molekule można wykonać w ciągu kilku godzin, uzyskując wynik, który zazwyczaj ma 90 procent dokładności. W porównaniu z rozwiązywaniem równania Schrödingera (które dla dużej molekuly zajęłoby lata) DFT stała się przemysłowym standardem obliczeń kwantowych.

Dodatek 3

Rower Einsteina

To proste ćwiczenie, które ilustruje trwałość prędkości światła, pochodzi od uczonego i popularyzatora nauki Carla Sagana. Wymyślił on scenariusz, w którym rowerzysta jedzie drogą ku tobie, gdy nagle duża ciężarówka przecina jego drogę i oba pojazdy raptownie skręcają, aby się wyminąć.

Ciężarówka nie jedzie w twoim kierunku, zatem światło pochodzące z jej boku dociera do ciebie z normalną prędkością światła, którą fizycy zapisują za pomocą litery c (od słowa *constant* – stały). Rowerzysta pedałuje w twoją stronę, światło pochodzące od niego dociera więc do ciebie z prędkością $c +$ jego prędkość. Oznacza to, że światło z roweru dotrze do twoich oczu przed światłem ciężarówki.

Kiedy ciężarówka przecina drogę rowerzysty, ten skręca w bok i najpierw dociera do ciebie światło dochodzące z jego nowego położenia (informujące o tym, że się poruszył), a potem dopiero światło ciężarówki, która przecina mu drogę.

Możesz zatem zobaczyć rowerzystę nagle skręcającego bez wyraźnego powodu (światło z ciężarówki jeszcze do ciebie nie dotarło), a następnie kilka sekund później przejeżdżającą za nim ciężarówkę. W tym scenariuszu zaczniesz się zastanawiać, dlaczego rowerzysta skręcił o kilka sekund za wcześniej. Jednak oczywiście to nie tak było.

Światło dobiegające z ciężarówki i światło skręcającego nagle roweru docierają do twoich oczu w tym samym momencie,

opowiadając bardziej sensowną historię, ale ponieważ rower poruszał się z większą prędkością, wysłana od niego wiązka światła powinna była dotrzeć pierwsza. Jedynym sposobem wyjaśnienia tego jest założenie, że prędkość światła pochodzącego od roweru nie wynosiła $c +$ prędkość jazdy roweru, ale tylko c , tak jak i w przypadku ciężarówki. Prędkość światła musi więc pozostawać taka sama, niezależnie od tego, jak szybko wszyscy się poruszają.

Dodatek 4

Oswajanie nieskończoności

Wiele problemów w fizyce teoretycznej powoduje pojawienie się nieskończoności. Weźmy na przykład eksperyment z podwójną szczeliną. Możemy zrobić w ścianie dwie dziury i wysłać ku nim foton. Biorąc pod uwagę dwie możliwe trajektorie jako prawdopodobne wyniki, obliczymy prawdopodobne miejsce jego dotarcia.

Jeśli wytnie się trzeci otwór w ścianie, zagadnienie jest takie samo. Obliczasz trzy trajektorie fotonu zamiast dwóch i szacujesz prawdopodobne wyniki dla wszystkich trzech. To samo z czterema dziurami, czterdziestoma dziurami lub czterystoma dziurami, aż w końcu ściana będzie mieć tyle dziur, że nie będzie już ścianą, lecz wielką pustą przestrzenią.

Oznacza to, że musimy obliczyć nieskończenie wiele trajektorii fotonu, ponieważ istnieje nieskończona liczba otworów (brak ściany = nieskończona liczba otworów). Jeśli jednak wysyłamy foton na ekran detektora bez ściany po drodze, to leci on oczywiście po linii prostej. Wydawałoby się zatem, że foton „wywachuje” (określenie użyte przez Feynmana) nieskończenie wiele możliwych trajektorii, które może przebyć, a następnie wybiera klasyczną trajektorię, tak jakby nieskończoności nawzajem się jakoś znosiły.

Inną puszką Pandory w QED jest kwestia samooddziaływania cząstek. Elektron ma ładunek ujemny, co oznacza, że oddziałuje z innymi ujemnie naładowanymi cząstkami. Teoretycznie rzecz ujmując, elektron powinien też oddziaływać ze sobą samym, ale

ponieważ elektron jest nieskończenie blisko siebie, samoodziaływanie daje w wyniku nieskończoność, gdy próbujemy je obliczyć.

Te dwa przykłady są dużym problemem, ponieważ nieskończoność nie jest rzeczywistością w fizyce. Istnieje ona w świecie matematyki abstrakcyjnej, ale w rzeczywistym Wszechświecie nie ma nieskończoności (Wszechświat nie mógłby ich pomieścić), kiedy więc teoria daje w rozwiązaniu nieskończoność, to jest to oczywisty sygnał, że z teorią jest coś nie tak.

Kiedy jakieś równanie zaczyna zmierzać ku nieskończoności, naukowcy mówią, że „wybucha”, i wiele miejsca w fizyce teoretycznej poświęca się próbom rozbrojenia tych numerycznych eksplozji. Aby uzyskać bardziej sensowne rozwiązania, robi się to zazwyczaj przez dokonywanie zmian w równaniach, wyprowadzanie nowych równań lub wprowadzanie nowych danych wejściowych.

Jedną ze sztuczek jest po prostu obcięcie wyniku w punkcie, w którym staje się on zbyt wielki (metoda zwana regularyzacją), ale jest to beznadziejnie prymitywne; niewiele lepsze niż płkanie nad rozwiązaniem i zignorowanie go.

Bardziej wyrafinowane podejście polega na zrobieniu czegoś, co nazywa się „renormalizacją”. Tym razem chodzi o to, aby wybrać własności dla pól (w większości przypadków je zgadnąć) i rozwiązać kilka różnych równań z tymi wartościami, aż do uzyskania pasujących odpowiedzi. Im więcej szczegółów się dodaje, tym bardziej rozwiązanie zbliży się do wyników eksperymentalnych.

Jest to matematyczny odpowiednik rysowania obrazu przestępcy z opisu kilku naocznych świadków. Zaczynasz od przyjęcia kilku założeń, na przykład dotyczących fizjonomii przestępcy, i poczynając od tych założeń, dokonujesz dalszych ekstrapolacji na podstawie opisów przedstawionych przez świadków. Na tej podstawie tworzy się różne szkice, a następnie sprawdza, czy do siebie pasują.

Jeśli są one dość spójne, wyszukujesz zdjęcie znanego przestępcy (wartość realna) i sprawdzasz, jak bliskie jest podobieństwo. Jeśli jest duże, to twoje założenia wyjściowe i metoda tworzenia portretu były dobre. Jeżeli nie, to zaczynasz od nowa z innymi założeniami

i technikami rysunku, wciąż od nowa, aż w końcu się uda. Szczerze mówiąc, jest to metoda prób i błędów, ale spełnia swoje zadanie.

Dodatek 5

Maluj wszystkimi kolorami kwarków

Widok koloru obiektu to tak naprawdę wykrycie drgań pola elektromagnetycznego. Elektrony w atomach i cząsteczkach pochłaniają lub emitują pewne ilości energii, które odpowiadają energiom emitowanych lub odbijanych fotonów.

Gdy foton wysokoenergetyczny wpada do twego oka, twój mózg tworzy na skutek tego zdarzenia kolor fioletowy, a gdy wpada w oko foton niskoenergetyczny, twój mózg tworzy wówczas kolor czerwony.

Cząstki podstawowe pod tym względem nie dają żadnych odczuć sensorycznych, czynią to tylko emitowane przez nie fotony. Nie jest to łatwe do wyobrażenia, ponieważ większość obiektów, których doświadczamy, ma jakiś kolor swojej powierzchni. Wyobraź sobie piłkę tenisową – jej powierzchnia jest przez nas postrzegana jako zielona, ale tak naprawdę oznacza to, że elektrony z powierzchni piłki tenisowej przekazują energię polu fotonowemu o wartości, którą twój mózg interpretuje jako kolor zielony.

Kwarki przekazują energię do pola fotonowego (mają ładunek elektryczny), ale energie te są zbyt duże, aby nasze oczy mogły je odczuć. Rzeczywisty „kolor” kwarków byłby takim samym „kolorem”, jaki ma wiązka promieni rentgenowskich lub promieni gamma, ostatecznie są więc niewidoczne.

To samo można powiedzieć o pojedynczym elektronie poruszającym się w przestrzeni. Jeżeli cząstka nie zderzy się z czymś lub nie wpadnie w sidła atomu i nie straci energii (którą on

wyemituje jako foton), to nigdy nie zobaczymy, że przylatuje do nas lub od nas odlatuje.

Elektrony, poruszając się w wodzie, przy okazji wydzielają niebieską poświatę (zjawisko zwane promieniowaniem Czerenkowa), ale w powietrzu wydają się nieco bardziej fioletowe (kolor pioruna) i nieco bardziej różowe lub zielone w śniegu. Jądro atomu, a w jego wnętrzu kwarki, protony i neutrony, jest jednak zupełnie niewykrywalne dla ludzkiego oka.

Podziękowania

Kiedy miałem czternaście lat, mój nauczyciel nauk ścisłych, pan Evans, dał mi podręcznik fizyki kwantowej. Szybko zakochałem się w tej dziedzinie i od tego czasu chciałem kiedyś napisać własną książkę na ten temat. Ta książka jest prawdziwym dziełem miłości i dlatego chcę podziękować wszystkim, którzy pomogli mi zrealizować to marzenie kujona.

Przede wszystkim wyrazy wdzięczności kieruję do BreeAnne Kelly (która prawdopodobnie kocha naukę jeszcze bardziej niż ja). Bree pomogła mi uporządkować książkę, pokazała, które fragmenty były niedopracowane, i pomogła im nadać odpowiedni ton, tak aby gotowy produkt był zabawny zarówno w czytaniu, jak i w pisaniu.

Chcę podziękować mojemu partnerowi w zbrodni, najlepszemu pisarzowi, jakiego znam, Karlowi Dixonowi. Karl dał mi bezcenne notatki na temat stylu pisania, pomógł dopracować wiele żartów i podtrzymywał mój dobry humor podczas całego procesu, nawet w chwilach kiedy nie miałem na to ochoty.

Dziękuję Andrew „Herkulesowi” Pettittowi, który dokonał istotnych poprawek w początkowych rozdziałach i powstrzymywał mnie od nielogicznego słowolejstwa: *Merci, mon ami!*

Dziękuję Marcusowi Loftowi i Philowi Pavetowi za upewnienie się, że moja fizyka była dokładna, a analogie nie zamąciły faktów.

Dziękuję Becky jeszcze raz za okazanie nieskończonej cierpliwości podczas mojej pracy nad tym projektem i za to, że pozwoliła mi zrobić to tak jak trzeba.

Dziękuję mojej nieustraszonej agentce Jen Christie za pomoc w napisaniu tej książki i za danie mi szansy... ponownie.

Dziękuję wszystkim w Robinson i Little, Brown za pomoc w ukończeniu tej książki i za uczynienie tego tak łatwym procesem: Duncanowi Proudfootowi za powierzenie mi tak ambitnego tematu; Amandzie Keats za koordynację procesu redagowania; Beth Wright, rzeczniczce prasowej, za informacje na temat mojego dorobku; Andy Hine i Kate Hibbert za negocjowanie wszystkich umów międzynarodowych; specjalne podziękowania kieruję do mojego redaktora Howarda Watsona, którego dbałość o szczegóły jest niezrównana. To był zaszczyt pracować z wami.

Chcę podziękować kilku autorom, których książki były niezbędne podczas pisania. Zatem chociaż nie spotkałem tych osób bezpośrednio, wyrażam wdzięczność Hagenowi Kleinertowi, Tomowi Lancasterowi, Stephenowi Blundellowi, Davidowi Tongowi, Anthony'emu Zee i Leonardowi Susskindowi za pomoc w zrozumieniu tego, czego nie rozumiałem, i za to, że czuję się bardziej pewny siebie.

O! Dziękuję Carly Rae Jepsen za muzykę, której słuchałem w trakcie pisania.

Dziękuję Seishi Shimizu za to, że jest inspiracją dla mnie jako naukowca i pisarza.

Dziękuję mojemu ojcu, Paulowi, za to, że zawsze we mnie wierzył. I, co najważniejsze, dziękuję wszystkim, którzy kupili moją pierwszą książkę, co było głównym powodem tego, że musiałem napisać tę następną. Wsparcie ze strony przyjaciół, rodziny, studentów i nieznajomych było ogromne. Mam nadzieję, że dla was zrobię to jeszcze raz!

Spis treści

[Wstęp. Koniec](#)

[Rozdział 1. Pałając dumą](#)

[Rozdział 2. Kawałki](#)

[Rozdział 3. Arystokraci, bomby i pyłki](#)

[Rozdział 4. Oswajanie bestii](#)

[Rozdział 5. Rzeczy stają się jeszcze dziwniejsze... Znowu](#)

[Rozdział 6. Kicia w pudle](#)

[Rozdział 7. Świat jest iluzją](#)

[Rozdział 8. Teoria kwantów musi umrzeć](#)

[Rozdział 9. Teleportacja, wehikuły czasu i wirowanie](#)

[Rozdział 10. Mechanika kwantowa dowodzi, że jestem Batmanem](#)

[Rozdział 11. Daleko](#)

[Rozdział 12. Linie i zawijasy](#)

[Rozdział 13. Fizyce cząstek przybywa muskulatury](#)

[Rozdział 14. Kochanie, gdzie mój Higgs?](#)

[Rozdział 15. Kłopoty z G](#)

[Kalendarium fizyki kwantowej i cząstek elementarnych](#)

[Dodatek 1. Bliższe spojrzenie na spin](#)

[Dodatek 2. Rozwiązywanie równania Schrödingera](#)

[Dodatek 3. Rower Einsteina](#)

[Dodatek 4. Oswajanie nieskończoności](#)

[Dodatek 5. Maluj wszystkimi kolorami kwarków](#)

[Podziękowania](#)